

УЧЕБНИК

Роберт А. Пиз

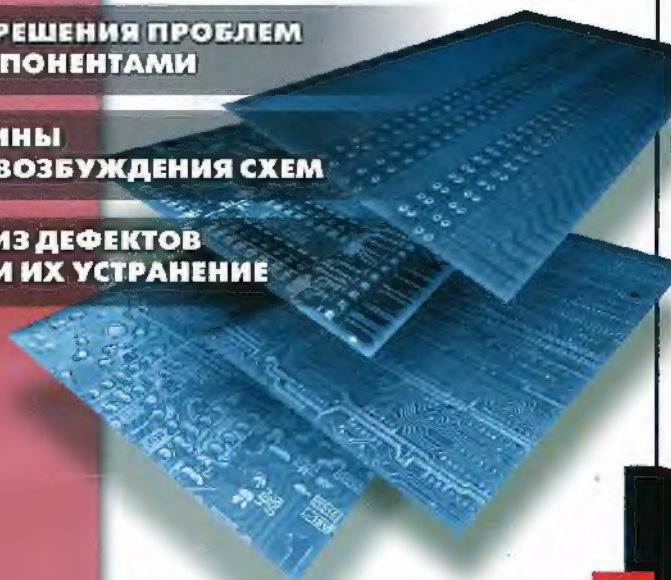
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

**ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА
ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ**

**ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ
С КОМПОНЕНТАМИ**

**ПРИЧИНЫ
САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СХЕМ**

**АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ
СХЕМ И ИХ УСТРАНЕНИЕ**



Серия «Учебник»

Роберт А. Пиз

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ**

**Поиск неисправностей и отработка
проектируемых схем**



Москва, 2001

ББК 32.844я75

ПЗ2

Пиз А. Роберт

ПЗ2 Практическая электроника аналоговых устройств. Поиск неисправностей и отработка проектируемых схем: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 320 с.: ил. (Серия «Учебник»).

ISBN 5-94074-004-9

Книга, написанная американским инженером Робертом Пизом, посвящена поиску неисправностей в аналоговых схемах, однако предлагаемые технические решения могут пригодиться и при работе с цифровыми устройствами.

Автор подходит к проблеме поиска и устранения различных дефектов с позиции инженера-проектировщика, иллюстрируя теоретические положения примерами из личного опыта.

В первой главе книги обсуждаются методы выявления неисправностей, тестирования схем и их компонентов. Во второй главе основное внимание уделено оборудованию для диагностики; последующие разделы содержат подробный анализ неполадок, связанных с пассивными и активными элементами и устройствами: резисторами, конденсаторами, диодами, транзисторами, операционными усилителями, источниками опорного напряжения, стабилизаторами и др. Также приводится информация о печатных платах и о кабелях.

Дополнительные сведения о причинах неисправностей представлены в многочисленных приложениях. Особо рассмотрены принципы использования технической документации.

ББК 32.844я75

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 0-7506-9499-8
ISBN 5-94074-004-9

Reed Educational & Professional Publishing Ltd (1991)
© Troubleshooting Analog Circuits 2nd Edition by R. Pease
© ДМК Пресс, 2001

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1. Начнем сначала. Философия и неисправности	16
1.1. Философский подход к поиску неисправностей	16
1.2. Если бы все и всегда работало.....	17
1.3. Хороший совет можно получить не только от эксперта	20
1.4. Учитесь искать подсказки	20
1.5. Спрашивайте, записывайте, фиксируйте, запоминайте	21
1.6. Планирование работы	22
1.7. Пусть законы Мерфи работают на вас	24
1.8. Выберите Царя проблемы	25
1.9. Документооборот как путь к успеху (или краху)	26
1.10. Анализ отказа	26
1.11. Ремонт по телефону – занятие тяжелое	28
1.12. Ремонтника компьютером не заменишь!	30
1.13. Компьютер – ваш помощник, но друг ли.....	31
1.14. Нет проблем? Ах, нет проблем! Будут!.....	31
2. Подбор инструментария	33
3. Резисторы и дроссели	50
3.1. Характеристики резисторов	51
3.2. Температурные коэффициенты	54
3.3. Переменные резисторы и потенциометры	56
3.4. Номинальные режимы работы потенциометров	57
3.5. Осторожно: механические повреждения	59
3.6. Когда резистор – не только резистор	60
3.7. Дроссели и трансформаторы	62
3.8. Эквивалентная схема трансформатора	62
3.9. Защита транзисторов от выбросов напряжения	64
3.10. Перегрев индуктивных элементов	67
3.11. Влияние внешних магнитных полей	68
4. Проблемы с конденсаторами	69
4.1. неполярные конденсаторы	71
4.2. Обкладки пленочных конденсаторов	72
4.3. Выводы пленочных конденсаторов	74
4.4. Эквивалентное последовательное сопротивление	77
4.5. Серебряно-слюдяные конденсаторы	78
4.6. Переменные конденсаторы	79
4.7. Методы добавления или замены типа	80
4.8. Как искать неисправности	82

5. Детали и монтаж: печатные платы, разъемы, реле и переключатели	83
5.1. Проблемы с печатными платами	84
5.2. Поиск утечек	86
5.3. Размещение деталей на печатных платах	91
5.4. Четырехпроводная схема, или Схема Кельвина	95
5.5. «Холодные» пайки	97
5.6. Радиотехника – наука о контактах	98
5.7. Неординарные методы	99
5.8. Реле и контакторы	100
5.9. Выключатели, переключатели и тумблеры	102
5.10. Провода и кабели	102
5.11. Выбор проводов	103
6. Диоды	105
6.1. Проблемы быстрого действия	108
6.2. Особенности переходных процессов	108
6.3. Особенности применения диодов	111
6.4. Стабилитроны	113
6.5. Светодиоды	115
6.6. Оптопары	116
6.7. Солнечные батареи	118
6.8. Батареи и аккумуляторы	119
7. Транзисторы: неисправности и их предупреждение	122
7.1. Коэффициент передачи	125
7.2. Полевые транзисторы	126
7.3. Мощные транзисторы	130
7.4. Правило пяти секунд	132
7.5. Технология изготовления	132
7.6. Разработка силовых схем	135
7.7. МОП транзисторы	136
8. Операционные усилители	139
8.1. Нельзя пренебрегать мелочами	140
8.2. Синфазные сигналы	141
8.3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала	142
8.4. Как надо измерять КОСС	146
8.5. Однополярное питание	149
8.6. Входное сопротивление или входной ток	150
8.7. Ложные неисправности	150
8.8. Реальные проблемы	152
8.9. Самовозбуждение операционных усилителей	154
8.10. Шумы: теория и практика	159
8.11. Дробовой шум	160

8.12. Техническая документация	161
8.13. Методы исправления ошибок	163
9. Подавление паразитных колебаний	166
9.1. Внимание! Самовозбуждение	168
9.2. Когда самовозбуждение – не самовозбуждение	169
9.3. Проблемы с компараторами	171
9.4. Чувствительность компараторов	173
9.5. Шумы в компараторах	174
9.6. Диапазон синфазных сигналов	176
9.7. Изменение уровня синфазного сигнала	177
9.8. Самовозбуждение повторителей	178
9.9. Защелкивание	181
10. Аналоговые и цифровые схемы	184
10.1. Таймеры	184
10.2. Цифровые интегральные микросхемы	186
10.3. «Плавающий» вход	186
10.4. Сигналы	188
10.5. Наводящие вопросы	192
10.6. Работа с ЦАП	194
10.7. Проблемы с АЦП	196
10.8. «Бумажные проекты» не для АЦП	197
10.9. Земляная петля	199
10.10. ПНЧ	199
10.11. ПЧН	200
10.12. Устройства выборки-хранения: электронные стробоскопы	201
10.13. Время апертуры	201
10.14. Время выборки	203
10.15. Мультиплексор	203
10.16. Электронные цифровые вычислительные машины	204
10.17. Программное обеспечение	204
11. Источники опорного напряжения и стабилизаторы	206
11.1. Стабилизаторы	207
11.2. Проблема максимального напряжения	208
11.3. Наихудший случай	209
11.4. Импульсные стабилизаторы	210
11.5. Разные стабилизаторы	212
11.6. Об игрушках и о серьезном	214
12. Практические советы из заглашника	216
12.1. Поиск неисправностей	216
12.2. Программа SPICE	217
12.3. Результаты статистических анализов	220
12.4. Держи ноги в тепле, а голову (и приборы) на холоде.....	222

12.5. Стрелочные приборы	222
12.6. Цифровые приборы	223
12.7. Источники сигналов	227
12.8. Не откладывайте на завтра то, что можно исправить сегодня	227
12.9. Системы и схемы	229
12.10. Настройка аналоговых схем	229
12.11. Макетные платы без пайки	230
13. Письма Бобу	233
14. Реальные схемы – реальные проблемы	256
14.1. Вернемся к электронным схемам	257
14.2. Еще кое-что из заглавника	272
14.3. Заключение	273
Приложение А.	
Цифровые микросхемы с нестандартной цоколевкой	274
Приложение В.	
Операционные усилители с нестандартной цоколевкой	275
Приложение С.	
Причины и последствия появления шумов в трехвыводных стабилизаторах напряжения	279
Приложение D.	
Измерение смещения нуля в быстродействующих компараторах	284
Приложение Е.	
Зависимость V_F от I_F у разных диодов	287
Приложение F.	
Как правильно читать техническую документацию	290
Приложение G.	
Еще раз о программе SPICE	299
Приложение H.	
Список статей Р. Пиза, посвященных поиску неисправностей	307
Алфавитный указатель	308

AUTEX Ltd.

Официальный представитель



ANALOG DEVICES

Специальные цены и комплексные
поставки электронных компонентов
более 30 фирм-производителей
под серийные проекты

Тел : (095) 334-7741, 334-9151
Факс: (095) 334-8729, 234-9991
info@autex.ru www.autex.ru

- Операционные усилители AD855x, AD857x - 0,2 мкс, 10 МГц
- Дешевые прецизионные АЦП AD7705 - 16 бит, 100 кГц
- Малопотребляющие АЦП AD7888 - 12 бит, 8 каналов
- 8-канальные ЦАП AD7839 - 13 бит, AD7841 - 14 бит
- Малопотребляющие ЦАП AD5541 / AD5542 - 16 бит
- Сигнальные процессоры ADSP
- Весь спектр продукции ANALOG DEVICES

ВВЕДЕНИЕ

Вступительное слово

«Парень, твоя идея настолько хороша, что еще через двадцать минут я поверю — она изначально принадлежит мне». Я редко слышу подобную похвалу в свой адрес, но наверняка заслужил бы такой комплимент, предложив опубликовать в журнале EDN цикл статей Боба Пиза «Поиск неисправностей и отладка аналоговых схем», и это, конечно, повысило бы мой авторитет в редакции журнала. Однако на самом деле авторы этой идеи Йон Титус (Jon Titus), вице-президент, председатель редколлегии и главный редактор журнала EDN, и Тарлтон Флеминг (Tarlton Fleming), тогда первый помощник редактора EDN, а в настоящее время менеджер отдела практического применения микросхем в корпорации Maxim Integrated Products Corporation.

В начале 1988 года Джон с редакторами штаб-квартиры издательства EDN (а также издательской компании Cahners Publishing Company) в г. Ньютон (Массачусетс) провел мозговой штурм, обсуждая, какие статьи можно было бы заказать работникам промышленности... Учитывая, что читатели EDN обычно используют этот журнал как источник практических идей для более эффективной работы, а также поиска неисправностей и отладки техники, Джон предположил, что необходимы статьи, посвященные именно этим вопросам.

Тарлтон, редактор популярного раздела Design Ideas¹ журнала EDN, постоянно сотрудничал с Бобом, который рецензировал присылаемые читателями схемы аналоговых устройств. Тарлтон вспомнил, что Боб рассказывал ему о книге, которую он собирался написать вместе с коллегами из компании National Semiconductor. Очевидно, Боб уже подготовил некоторый материал по вопросам поиска неисправностей. Нужно было выяснить, предоставит ли National Semiconductor издательству EDN права на публикацию фрагмента этой книги. Тарлтон начал переговоры.

¹ Наиболее близкий русский вариант — «Радиоинженеру на заметку». — Прим. переводчика.

Некоторое время спустя в EDN получили объемистый пакет. В нем содержался текст того, что в конце концов стало первыми тремя частями написанного Бобом цикла статей. К этому времени Тарлтон покинул Восточное побережье и отправился на поиски счастья и успеха в Силиконовую долину. Таким образом, на рецензирование подготовленный Бобом материал передали мне. Я быстро просмотрел текст, и он меня заинтриговал.

Мы с Бобом практически сверстники – я всего на несколько лет старше. Кроме того, оба закончили Массачуссетский технологический институт, хотя во времена студенчества не были знакомы. Впервые я услышал о Бобе, когда он работал в компании George A. Philbrick Researches, которая в настоящее время является частью Teledyne Components и расположена в городе Дедхаме (Массачусетс). Уже в то время – 60-е – начало 70-х – Боб был плодовитым автором. Он делился своими мыслями и техническими идеями с клиентами Philbrick и инженерами-разработчиками аналоговых схем, читателям внутреннего издания фирмы The Lightning Empiricist, а также с читателями коммерческих журналов, таких как EDN.

Уже этими ранними публикациями Боб завоевал себе авторитет не только специалиста и эксперта, но человека с удивительным чувством юмора и любовью к каламбурам. Некоторые считают игру слов примитивной формой юмора. Другие не стесняются своей любви к каламбурам, именно к этой категории относимся мы с Бобом. Много лет назад, впервые прочитав написанный Бобом материал, я подумал, что, если встречу автора, он мне наверняка понравится. Поэтому, когда мне в руки попал присланный в EDN текст, я почувствовал, что после долгой разлуки обрел старого друга.

Форма подачи материала отличалась от принятой в EDN. Конечно, это был технический текст, но, по сравнению с тем, что мы обычно публиковали, написанный легко. Формул было немного, а сложные схемы вообще отсутствовали.

Понравится ли это читателям? Я решил, что наверняка понравится: рукопись насыщена содержательными и четко сформулированными идеями. Стил изложения, конечно, необычен.

Редакция журнала предъявляла жесткие требования к текстам, даже абсолютно понятные и читабельные вгонялись в принятые рамки. Теперь ограничения несколько ослаблены. По-прежнему, добиваясь ясности изложения, мы подвергаем статьи переделке, но при этом стараемся сохранить стиль и индивидуальность автора. Я считаю, что одной из причин изменения нашего отношения к этому вопросу был успех статей Боба.

Стиль Боба отражает не только его чувство юмора, но и своеобразие причудливой натуры. Однако наиболее ярко стиль проявляется в высокой требовательности к себе и в исключительном профессионализме. Стоит особо отметить, что если бы мы попытались перекроить присланный материал, придав ему традиционную форму, то это привело бы к значительным содержательным потерям. Причины такого успеха Боба в том, кто он и как он подходит к решению проблем. Сохранив стиль Боба, мы смогли донести до читателя его индивидуальность.

Одно из правил, принятых в EDN, – не использовать риторических вопросов. Ответ читателя на такой вопрос может быть совершенно неожиданным, что иногда приводит к искажению авторской мысли. В редакции шутят: риторические

вопросы – строго по карточкам. При подготовке каждого номера наш выпускающий редактор, Джоан Морроу Линч (Joan Morrow Lynch), позволяет одному из редакторов использовать риторический вопрос. Заявки выполняются по принципу: первый вошедший – первым обслужен, но Джоан может отказать, если претендент задал уже слишком много подобных вопросов.

Прочитав текст, ставший первой частью книги «Поиск неисправностей и отладка аналоговых схем», я понял, что любая глава с лихвой покрывает годовой лимит нашего журнала на риторические вопросы. Но я спросил себя: «Почему бы и не рискнуть?» Сначала возникает вопрос, а потом Боб решает проблему.

На мой взгляд, можно выделить одну уникальную особенность этой книги: к поиску неисправностей автор подходит с позиций инженера-проектировщика. Читатели журнала EDN – проектировщики. Боб Пиз – очень талантливый проектировщик. Кроме того, он смотрит на задачу поиска неисправностей не свысока, для него это неотъемлемая часть профессионализма. Просто наслаждаясь этим, он готов рассказать всем о полученном опыте изгнания дьявола из электронных схем. И читатели это поняли. Их реакция была ошеломляющей. Никогда в истории журнала (издается почти 35 лет) ни один из материалов не вызывал столь активного читательского отклика. Каждые несколько недель в редакцию поступает новая пачка карточек обратной связи с читателями, на которых, в дополнение к запросам более подробной информации о рекламируемых журналом товарах и услугах, есть и отзывы. В пачках карточек, относящихся к номерам, где опубликованы статьи из этой серии, обязательно содержатся многие почтовые открытки, сообщающие, что статьи Боба великолепны и что это лучшие материалы из когда-либо опубликованных в EDN. А по результатам опроса во всех 12 номерах статьи Боба оказались наиболее читаемыми. После того как цикл закончился, стали поступать просьбы издать статьи отдельной книгой. Сначала таких писем было немного, но затем они полились потоком. Итак, всем тем, кто просил об отдельном издании, а также тем, кто никогда не видел цикла статей в EDN, но сожалел, что нет руководства по поиску неисправностей, написанного от лица разработчика, мы предлагаем эту книгу.

Чтобы у вас не сложилось впечатление, что я был единственным сотрудником EDN, редактировавшим работу Боба, должен пояснить, что я не был даже тем, кто выполнил большую часть работы по редактированию. Вместе со мной над этой книгой работали старший редактор Чарльз Г. Смолл (Charles H. Small) и Анни Ватсон Свейджер (Anne Watson Swager), сейчас она редактор EDN по Восточному побережью в Винневуде (Пенсильвания). Литературное редактирование всех статей было выполнено старшим редактором Джулией Анни Шофилд (Julie Anne Schofield). Работа по графическому оформлению сделана в Ньютоне художественным отделом EDN, возглавляемым Кеном Расикотом (Ken Racicot).

Кроме того, многие фотографии предоставлены коллегами Боба по компании National Semiconductor. Несмотря на то что перечислено уже много наших коллег, принимавших участие в подготовке этой книги, список неполон. Над созданием журнала EDN работает множество людей, и перечислить всех, кто имел отношение к статьям Боба Пиза, не представляется возможным.

Можно только отметить то, что работать над этим циклом было интересно. Когда у меня состоялось первое интервью по поводу этой работы в EDN, Рой Форсберг (Roy Forsberg), ныне издатель другого журнала компании Cahners, называющегося "Test and Measurement World", отметил, что профессия редактора – самая интересная среди всех связанных с электроникой. В то время я пропустил замечание Роя мимо ушей, решив, что он привел его в своих интересах. Но работа над статьями Пиза развеяла все мои сомнения о том, насколько интересной она может быть. Редактирование этого цикла стало для меня исключительным событием! Я надеюсь, что статьи – а теперь и эта книга – содержат не только советы Боба по поиску неисправностей в электронных схемах, но и тот заряд энергии, который получили все, кто принимал участие в работе над проектом.

Дэн Страссберг (Dan Strassberg),
ответственный редактор журнала EDN

Благодарности

Мне бы хотелось посвятить эту книгу моему старому другу Брюсу Седдону (Bruce Seddon). Уже более 30 лет он помогает мне по достоинству оценивать изысканность наиболее сложных разработок. Этому не учат в школе, вот почему, чтобы разобраться, необходим умудренный опытом наставник. Брюс всегда находит время выслушать меня и протянуть руку помощи. А я ни разу за 30 лет не собрался поблагодарить его, тем самым выставив себя неблагодарным и ленивым разгильдяем, поэтому теперь самое время сказать: «Спасибо, Брюс!»

Я хотел бы выразить свою признательность более чем четырем десяткам моих друзей, которые помогали проверять, править черновики этих статей и дополняли мою работу. Особенно я благодарен Джиму Мойеру (Jim Moyer), Тиму Регену (Tim Regan), Деннису Монтичелли (Dennis Monticelli), Ларри Джонсону (Larry Johnson) и Дэну Страссбергу (Dan Strassberg) из EDN, добавившим важные технические подробности, о которых я не знал. Также я хотел бы поблагодарить Синди Льюис (Cindy Lewis) из Sun Circuits Inc. (Санта Клара, Калифорния) за помощь в подготовке сводной таблицы по современным материалам печатных плат, приведенной в главе 5. Кроме того, нельзя не поблагодарить Минео Яматаки (Mineo Yamatake) за предложенную элегантную схемотехнику усилителя для термопар, Стива Аллена (Steve Allen), Пегги Виллис (Peggi Willis), Эла Невеса (Al Neves) и Френа Хоффарда (Fran Hoffard) за подготовленные фотографии, а также нашего «мастера на все руки» Эрролла Дитца (Errolle Dietz) и нашего «завхоза» Карлоса Хуэрты (Carlos Huerta). Скажем спасибо Хендрику Санто (Hendrick Santo) и сотрудникам бутика Natasha's Attic в Сан-Хосе за их помощь в конструировании, разработке стиля и монтаже «царских одежд». Низкий поклон Кэрол С. Льюис (Carol S. Lewis) из HighText Publications в Сан-Диего, а также всем редакторам EDN, поработавшим над моей книгой: Джулии Анни Шофилд, Анни Ватсон Свейджер, Чарльзу Г. Смоллу и Дэну Страссбергу. Им пришлось попотеть, работая над каждым словом и фразой, которые мы обсуждали и о которых спорили, оттачивая и совершенствуя текст.

Я также признателен Джойс Гилберт (Joice Gilbert), секретарю нашей команды, которой пришлось перепечатать гораздо больше, чем было оговорено. Она поверила мне, когда я сказал, что придется перепечатать всего 50 или 60 страниц... Мы никак не могли предположить, что эти 50 страниц каким-то образом разрастутся до 280! Учтите: не только Джойс перепечатала все материалы этой книги, но и я, поскольку обнаружил, что творческий процесс активизируется, если я работаю с хорошим текстовым редактором. Джойс не пришлось печатать ничего, чего бы не напечатал я сам. Как бы то ни было, пока цены на компьютеры снижаются и снижаются, я никогда больше не стану требовать от кого-либо повторно набирать такой текст. Нельзя сказать, что сразу набрать текст в ASCII-совместимом формате сложно или дорого. Я создавал свои первые черновики на старом компьютере Coleco ADAM с не совместимой ни с чем системой памяти на кассетах. Затем все, что было написано мной, Джойс набирала в текстовом редакторе Multimate компании Ashton-Tate, и мы пересылали ASCII-файлы в издательство EDN. Получив верстку, я потратил десятки часов на правку, оттачивание, совершенствование и внесение добавлений. Еще я хочу выразить благодарность Ванде Геррет (Wanda Gerret), которая терпеливо выслушивала огромное количество моих глупых вопросов о том, как заставить текстовый редактор нормально работать. Если кто-нибудь из вас, читающих сейчас эти слова, собирается когда-либо писать книгу, стоит сперва подумать о том, что надо делать и в какой последовательности. Например, это издание было задумано как одна статья для книги Эла Келша (Al Kelsch) об импульсных стабилизаторах. Если бы я мог предположить, насколько масштабным станет проект, то действовал бы не столь глупо и неэффективно. Хотя тогда, возможно, я вовсе не приступил бы к работе...

Что же касается технических находок и идей по поиску неисправностей, то будет справедливо, если вы, после того как прочтете мои советы, поделитесь своими замечаниями!

Боб Пиз, главный ученый National Semiconductor Corp.,
M/S C2500A, P.O. Box 58090, Santa Clara, CA 95052-8090

Об авторе

Официально Боб Пиз занимает должность главного ученого (staff scientist) в отделе разработки промышленных аналоговых интегральных схем компании National Semiconductor Corporation в г. Санта-Клара (Калифорния). В этой корпорации он работает с 1976 года. Пиз – один из наиболее известных в мире разработчиков аналоговых схем. Более четверти века он занимается созданием практичных, пригодных для промышленного производства аналоговых схем, что приносит как удовольствие ему, так и прибыль (и ему, и его работодателю), а также пишет статьи, посвященные работе с аналоговыми схемами.

Если упомянуть только впечатляющие свидетельства профессионального мастерства Боба, то рассказ об этом человеке будет неполным – о нем можно сообщить еще много интересного. Одно из любимых хобби Боба – исследование нехоженных

троп и дорог. Он путешествует пешком, на лыжах или на велосипеде – иногда в одиночку, а иногда вместе с женой и двумя сыновьями. Часто он прокладывает свой маршрут по насыпям заброшенных железных дорог в Америке и Англии. Помимо покоя, тишины и удовлетворения эти странствия приносят ему удовольствие при созерцании видов Америки, открывавшихся немногим путешественникам. Любопытство, толкающее Боба на исследование старых железных дорог, отражается и в других его занятиях, как связанных, так и не связанных с профессиональной деятельностью.

К примеру, у Боба есть еще одно хобби: разработка преобразователей напряжение-частота (ПНЧ). Для большинства занимающихся этим проектирование подобных устройств – служебные обязанности. Хотя Боб иногда разрабатывает ПНЧ для использования в устройствах, выпускаемых корпорацией National, он часто делает это просто для удовольствия, так как считает создание ПНЧ полезной и интересной задачей. Несколько лет назад он ради шутки собрал преобразователь только на электронных лампах. Получив эту схему, Пиз доказал, что компания George A. Philbrick Researches, в которой он проработал свои первые 14 лет (позднее переименована в Teledyne-Philbrick, сейчас называется Teledyne Components of Dedham), могла бы заняться производством ПНЧ еще в 1953 году – на восемь лет раньше, чем он получил степень бакалавра по специальности инженера-электрика в Массачусетском технологическом институте. И через двадцать лет после того, как Боб создал один из своих первых транзисторных преобразователей напряжение-частота типа 4701, эта схема по-прежнему отлично продается компанией Teledyne-Philbrick. История о том, как Пиз одним из первых начал разрабатывать преобразователи напряжение-частота, подробно изложена в одной из глав книги «Разработка аналоговых схем: искусство, наука и люди» (Analog Circuit Design: Art, Science, and Personalities, 1991).

Еще Боб любит писать статьи – несомненно, ему доставляет удовольствие передавать другим свои знания. Им опубликовано около шестидесяти журнальных статей (не считая того цикла в EDN, на котором основана эта книга). Кроме того, Боб является автором приблизительно десяти патентов США. Недавно он стал ведущим колонки в журнале Electronic Design, где раз в две недели рассказывает о различных аспектах разработки линейных или аналоговых схем.

Боб испытывает подлинное удовольствие, когда видит, как его идеи используют другие инженеры. Для примера приведем одно из достижений, заслуживающих наибольшего восхищения, – предусилитель для сейсмического прибора, который Пиз в течение обеденного перерыва сделал для одной аэрокосмической компании. После долгих лет службы этот усилитель все еще работал на Луне, передавая данные о лунотрясениях (хотя не так давно, вероятно, разрядились его батареи). Боб также создал компактный преобразователь напряжения в частоту весом около 9 г, который в 1980 году был поднят на вершину Эвереста американской медицинской научно-исследовательской экспедицией из Медицинской школы Калифорнийского университета в Ла Жолла, где использовался для соответствующих исследований.

К должностным обязанностям Боба, помимо разработки источников опорного напряжения и стабилизаторов, датчиков температуры и ПНЧ, относятся проведение консультаций с коллегами, решение вопросов, поставивших в тупик других инженеров, а также рецензирование разработок коллег. К тому же Боб уже давно сотрудничает с журналом EDN как внештатный редактор, рецензирующий присланные читателям конструкции аналоговых схем.

1. НАЧНЕМ СНАЧАЛА.

ФИЛОСОФИЯ И ПОИСК НЕИСПРАВНОСТИ

Первая глава посвящена взаимосвязи эффективного поиска неисправностей с тем, как вы обдумываете возникающие проблемы. Следующая – оборудованию для диагностики, которое вам будет нужно купить или сделать. Остальные главы рассказывают о некоторых наименее понятных и наиболее запутанных свойствах пассивных и активных элементов и устройств. Также мы поговорим о печатных платах и кабелях, соединяющих их.

1.1. Философский подход к поиску неисправностей

Если вы вспоминаете урок философии в школе как самый скучный и думаете, что эта книга будет наводить такую же тоску, то вы ошибаетесь. Мы собираемся поговорить о реальном мире, обсудить примеры ошибок и промахов и то, как исправить первые и избежать вторых. Обсудим те неприятности, которыми нам пытаются досадить весь внешний мир. Рассмотрим Проблемы с большой буквы «П» и пути их решения.

Я и мои коллеги из компании National Semiconductor (NSC) несколько лет назад решили, что нужно написать книгу об импульсных источниках питания. Практически все инженеры, занимающиеся как прикладными задачами, так и разработкой, изъявили желание принять участие в этом проекте. Я написал главу, посвященную поиску неисправностей. В настоящее время перспективы первоначального проекта сомнительны, а вот глава про поиск неисправностей состоялась, и вы, читатели этой книги, надеюсь, сможете извлечь из нее пользу. Глава разрослась настолько, что стала книгой. Я, возможно, и не отношусь к самым лучшим в мире специалистам по ремонту аналоговых устройств, однако очень хорошо в этом разбираюсь. Так случилось, что именно мне выпало сесть за письменный стол и зафиксировать все, что связано с поиском ошибок и неисправностей.

Технологические приемы поиска неисправностей, например в импульсном источнике питания, чаще всего можно использовать при работе с другими аналоговыми

системами. Возможно, они будут полезны и при работе с большинством цифровых аппаратных средств. Не нужно быть создателем источников питания для того, чтобы понять, насколько полезна эта книга. Если вы конструируете и собираете любые аналоговые схемы, то эта книга для вас.

Возможно, найдутся инженеры, хорошо разбирающиеся в цифровых схемах, компьютерах, микропроцессорах и программном обеспечении, которые могли бы написать о проблемах поиска неисправностей в схемах такого типа. Это, несомненно, порадовало бы меня, так как рассказывать об этом я точно не собираюсь. Нельзя знать все обо всем, а цифровые схемы – именно *то*, в чем я не разбираюсь.

1.2. Если бы все и всегда работало...

Почему же нас интересует поиск неисправностей? Во время работы над проектами, требования к которым очень сложны, даже лучшие инженеры сталкиваются с тем, что созданная схема не действует так, как было задумано, по крайней мере первое время. Не знаю, как обстоят дела с импульсными стабилизаторами, но мне попали на глаза материалы одного производственного исследования дисководов. Там было сказано, что при первом включении обычно не работает от 20 до 70%. Понятно, что доля отказавших дисководов может колебаться случайным образом от 1 до 100%. Но инженеры и техники, работающие на производстве, должны быть готовы к ремонту в среднем 20, 40 или 60% этих капризных устройств.

Источники питания, в которых используются импульсные стабилизаторы, – тоже достаточно сложные устройства. Если выпускать их партиями по 100 штук, то не стоит удивляться, если встретится партия, в которой 12 устройств будут требовать ремонта, а в другой нужно будет отремонтировать уже 46 устройств. Хорошо известно, что поиск неисправностей в только что разработанном устройстве, дефекты которого еще плохо изучены, может оказаться непростой задачей. Но она еще более усложнится, если конструкция устройства устарела, а характеристики используемых деталей не соответствуют требованиям. Искать неисправности становится намного сложнее при отсутствии подробной документации с описанием того, как должно функционировать устройство, и разработчика. Даже если сначала бороться с дефектами не надо, то это всего лишь чудесные быстротечные мгновения. Вы можете, конечно, некоторое время не исправлять дефекты и даже попробовать полностью отказаться от этого.

И что же получится, если вы решите, что бороться с дефектами незачем? Возможно, в первой партии обнаружится всего три или четыре неисправных устройства, и вы решите, что это не причина для волнения. Во второй партии доля брака составит 12%, и большая часть отказов будет иметь те же симптомы, что и дефектные устройства из первой партии. В следующих трех партиях доля брака составит соответственно 23, 49 и 76%. И когда вы наконец-то найдете время для того, чтобы изучить проблему, то поймете, что было бы гораздо дешевле исправить дефект, занявшись этим пару месяцев назад. Вот что может получиться в соответствии с законами Мерфи, если вы попытаетесь отказаться от рутинной работы по исправлению дефектов... Нам всем доводилось видеть, как это бывает.

Если у вас есть партия аналоговых устройств, в которых нужно устранить дефекты, то почему бы вам не воспользоваться процедурой поиска неисправностей, описанной в литературе? Хороший вопрос, и ответ на него очень прост: до настоящего времени почти ничего не написано о том, как искать дефекты в таких схемах и устройствах. Самое лучшее из уже написанного, что мне удалось отыскать, – это пара страниц в книге Жири Достала (Jiri Dostal) [1]. В ней приведено несколько основных принципов поиска неисправностей в довольно простой и небольшой схеме: источник опорного напряжения-стабилизатор. Все, что написал Достал, написано очень здорово. Но в книге всего несколько страниц с советами по устранению дефектов, и многое из того, что необходимо было бы объяснить, осталось за рамками издания¹.

О методах поиска дефектов можно почитать у Джона Ай. Смита (John I. Smith) [2]. Смит объясняет, почему нельзя считать, что схема была создана безошибочно, если обнаружилось, что работает она «не так, как надо». К сожалению, весь тираж книги уже распродан. Компания Analog Devices продает книгу Data Converter HandBook (Справочник по преобразователям данных) [3], и в ней несколько страниц посвящено интересным идеям и советам, что проверять при поиске дефектов в схемах преобразователей данных и в аналоговых схемах.

Но мне, тем не менее, не удалось найти самого интересного – обобщенной информации. Когда я начинал писать о проблемах, связанных с исправлением дефектов, то понимал, что в этой области царит полная пустота. Вот я и решил заполнить пустоту – получилась книга, которая лежит перед вами.

Вероятно, вы собираетесь использовать для поиска неисправностей универсальное оборудование. Что же вы можете купить для полноценной работы и отладки? Я подробно рассмотрю этот вопрос в следующей главе. А пока замечу, что если вам нужно выявить дефекты в схемах стоимостью в несколько миллионов долларов, то придется подумать о покупке тестового оборудования за \$100000. За эти деньги вы, естественно, получите простейшую модель этого класса. А после того, как вы приобретете этот аппарат, то прежде чем сможете им воспользоваться, придется потратить много времени и средств на его установку, наладку и программное обеспечение. С другой стороны, вы, конечно, можете купить тестер за \$90, который поможет отыскивать «коротыши» на печатных платах. Ну а в ценовом диапазоне от \$90 до \$100000 ассортимент специального оборудования для поиска неисправностей невелик. Если вы хотите купить осциллограф, то вам предложат универсальный осциллограф; если нужен цифровой вольтметр, то предложат универсальный.

Некоторые осциллографы и вольтметры лучше других подходят для поиска неисправностей (более подробно об этих различиях читайте в следующей главе), но в основном вам придется положиться на собственный разум.

¹ Недавно я перечитывал книгу Достала и считаю, что она до сих пор остается наилучшей технической книгой по операционным усилителям. По сравнению с книгой Тома Фредериксена (Tom Frederiksen) “Intuitive IC Op Amps” (Просто об интегральных схемах операционных усилителей), она более полная, технически более правильная, но и более сложная для восприятия. Она, безусловно, *должна* быть такой, так как стоит \$113. Эта книга постепенно устаревает, и я надеюсь, что автор планирует ее переиздать в обновленной редакции.

Собственный разум... Конечно, ЭТО средство всегда под рукой, но что с того? Одна из моих любимых цитат из книги Жири Достала гласит, что процесс поиска неисправностей должен напоминать не столько борьбу, сколько фехтование. Если ваша работа по поиску неисправностей выглядит как борьба с непримиримым оппонентом (или компонентом), то это означает, что вы, возможно, используете неверный подход, ненадлежащие инструменты или применяете их неправильно. Об этом мы поговорим в следующей главе. Знаете ли вы, какое влияние оказывает отказавший компонент на работу схемы, и знаете ли вы, каковы наиболее вероятные причины его отказа? С этим мы будем разбираться в последующих главах. И наконец, знаете ли вы, как надо размышлять о Проблеме? Именно этому вы и должны научиться, прочитав эту главу.

Даже если ничего пока не испортилось, не сидите без дела. Одно из первых необходимых дел – переписать все компоненты, которые потенциально могут быть причиной сбоя. Вам может пригодиться весь список – до последней строчки. Я страстный любитель историй о паровых двигателях, позвольте мне рассказать вам одну из них, изложенную в книге «Знаменитые строители паровозов» (Master Builders of Steam) [4]. Британский конструктор В. А. Станьер (W. A. Stanier) заканчивал разработку нового класса трехкотловых паровозов с колесной формулой 4-6-0 (четыре маленьких направляющих колеса перед ведущими колесами, шесть ведущих колес, маленькие задние колеса отсутствуют). Эти паровозы оказались «идеальными дымарями, они просто не давали пара». Итак, разработчики паровоза сформировали два списка: что могло бы работать неправильно и что отказать не могло. Второй список они отложили в сторону.

В надежде справиться с проблемой инженеры указывали, какие изменения необходимо внести в конструкцию каждого нового варианта: «Первоначальные трудности привели к необходимости внесения изменений, и каждый новый вариант мог потребовать особого комплекса доработок». Руководителей производства локомотивов «охватила дрожь, так как создавалось впечатление, что чертежи с изменениями непрерывным потоком сыпались из Дербя (месторасположение конструкторского бюро – *прим. ред.*), постоянно нарушая график работ в мастерских». (Производственникам это наверняка понравилось, не правда ли?) В результате дефект пришлось долго искать, так как он попал в список «что отказать никак не могло».

Позвольте мне процитировать замечательные шокирующие слова из этого рассказа: «Первоначальные трудности всегда влекут за собой две проблемы. Первая состоит – в том, что большое количество ключей к разгадке носят весьма субъективный характер, а вторая – в том, что наблюдается злоупотребление доверием. Под последним я подразумеваю ситуацию, когда некий фактор считается абсолютно надежным только на основании логического предположения и все ищут причину в другом месте. А на самом деле это предположение абсолютно нелогичное, и фактор, считавшийся надежным, – причина всех проблем. В случае с паровозами Станьера этим фактором оказалась низкая степень пароперегрева. Конструктор был настолько убежден в том, что принятая степень пароперегрева достаточна для работы двигателя, поэтому необходимое увеличение зоны пароперегрева откладывалось. В то время в экспериментальном отделе Локомотивного

конструкторского бюро работало несколько весьма способных инженеров, но они были слишком молоды, и их голоса никто не слышал. Результатам весьма тщательно проведенных ими исследований пароперегрева не поверили». Но ни с кем из ваших знакомых, конечно, такого не бывало, не так ли?

1.3. Хороший совет можно получить не только от эксперта

Вы предпочитаете просить совета исключительно у эксперта. В конце концов только эксперт знает, как решить сложную проблему – не так ли? Нет, не так. Иногда основная причина необнаружения сбоя заключается в том, что вы слишком плотно занимались этой схемой и ничего не видите из-за того, что чрезмерно «привыкли» к ней. Отличный результат дает консультация с одним или двумя коллегами, которые не столь хорошо знают вашу разработку. Они могут высказать отличную догадку, которая решит вашу проблему. Часто техник высказывает столь же гениальную гипотезу (или просто угадывает, в чем дело), как и находчивый инженер. Если такое случится, то не забудьте, кто именно спас вашу голову от позора. Некоторым не просто «везет» – возможно, у них есть настоящая способность решать сложные проблемы, находить отгадки и с помощью дедуктивного метода определять причину неполадки.

Друзья с такими талантами дороже золота.

В компании National Semiconductor мы обычно предлагаем своим коллегам критически проанализировать только что разработанную схему устройства. Я обещаю поставить выпивку любому, кто отыщет очевидную ошибку в разработанной мной схеме. Мы, *откровенно говоря*, называем это «пивной проверкой». Это очень полезно, так как за несколько кружек пива коллеги исправят часть глупых ошибок в моей схеме – тех ошибок, которые я самостоятельно, возможно, обнаружил бы на заключительном этапе, затратив на это куда больше усилий и средств. К тому же мы все получим урок. И никогда нельзя заранее предсказать, кто именно отыщет незаметные капризные дефекты или случайную, но по настоящему опасную ошибку. В этой проверке участвуют *абсолютно все* техники и инженеры.

1.4. Учитесь искать подсказки

Существуют четыре основных «волшебных» вопроса, которые вы или я должны задать, если нас привлекли к поиску неисправностей в чужой разработке:

1. Эта схема когда-нибудь работала?
2. На основании каких признаков вы делаете вывод о том, что схема работает правильно?
3. Когда схема стала работать плохо или отказала?
4. Какие еще симптомы проявлялись непосредственно перед отказом, сразу после отказа или во время отказа?



Рис. 1.1. Критика коллег – эффективный способ устранить ошибки в проекте. Коллеги «подловили» автора на грубой ошибке, которую они нашли благодаря тому, что знали схему не настолько хорошо, как он

Подсказки, которые вы получаете в ответах на эти вопросы, возможно, позволят сразу легко решить проблему. Если же нет, они помогут вам в конце концов выйти на правильный путь. Таким образом, даже если отказ происходит в вашем собственном проекте, вам следует задать эти вопросы самому себе, вашим техникам и всем, кто работал с вашим проектом, и ответить на них настолько подробно, насколько это возможно.

К примеру, если ваш сосед по комнате позвонит вам и скажет, что его машина встала посреди дороги, а потом попросит домкрат, то вы наверняка поинтересуетесь, что случилось. Если коллега ответит, что фары светят все менее и менее ярко, то это и будет *подсказкой*.

1.5. Спрашивайте, записывайте, фиксируйте, запоминайте

Задавая четыре «волшебных» вопроса, обязательно записывайте ответы, лучше в записную книжку. Опытный руководитель отдела испытаний, с которым мне довелось работать, Том Миллиган (Tom Milligan), обычно говорил своим техникам: «Если при сборе данных вам встретится странное значение, то запишите уровень его странности». Это настолько важный совет, что мы назвали его законом Миллигана. Несколько важных записей могут сэкономить часы рабочего времени. Ключи к загадкам вы найдете; но их необходимо сохранить и понять.

Следует задавать не только эти четыре вопроса, но также и те, которые будут возникать по мере получения ответов. К примеру, время от времени какой-нибудь

начинающий инженер-производственник приходит ко мне с кучкой интегральных схем, которые серьезно сбоят на каком-либо из этапов проверки. Я спрашиваю его, сбоят ли эти схемы на других тестах, и в ответ слышу, что испытательная установка притормозила проверку после того, как был зафиксирован первый сбой. Более опытный инженер осуществил бы проверку в режиме ПОЛНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ, и именно это я прошу сделать новичка.

Кроме того, если *вы* просите кого-либо другого дать совет, у вас все факты должны быть разложены по полочкам, по меньшей мере так, чтобы вы четко все себе представляли и не усугубляли проблему. Я работал с людьми, которые сначала говорили мне одно, а через несколько минут – прямо противоположное. Это как раз то, что моментально выводит меня из себя. Никто не поможет вам эффективно искать неисправности, если вы не будете точно знать, какое напряжение требуется для цепи: +12 В или ± 12 В, и в ответ на вопрос начнете выдавать противоречивые предположения.

И если я спрошу вас, когда схема начала барахлить, то не надо отвечать «в 15:25». Меня интересуют другие уточнения, такие как «приблизительно через две минуты после того, как я поместил ее в печь с температурой 125 °С» или «сразу после того, как я подключил нагрузку сопротивлением 4 Ом». Так что, зная немного больше о поиске неисправностей, можно научиться видеть подсказки, которые жизненно необходимы для диагностики неисправностей.

1.6. Планирование работы

Даже простейшая проблема с делителем на резисторах дает отличную возможность подготовить разумный план. Предположим, у вас имеется цепь из 128 последовательно соединенных резисторов номиналом 1 кОм (рис. 1.2). Подав напряжение 5 В на верхний конец цепи и 0 на нижний, можно было бы ожидать, что в середине цепи напряжение будет 2,5 В. Если напряжение будет равно не 2,5 В, а 0 В, то вы могли бы начать поиск неисправности, измеряя напряжение на всех резисторах, проверяя их один за другим и начав работу с верхнего конца. Но подобная стратегия абсурдна! Проверьте напряжение, скажем, на резисторе № 96, который расположен на полпути от середины цепи до ее конца. Далее, в зависимости от того, будет ли измеренное напряжение низким, высоким или нормальным, попробуйте проверить резисторы № 112 или № 80, расположенные на 5/8 или 7/8 этого пути. Затем проверьте резистор № 120 или № 104, № 88 или № 72, разбивая цепь неким подобием метода половинного деления или последовательного приближения, – такой подход окажется более эффективным. Всего через несколько измерений (около 7) вы сможете выяснить, какой резистор разбит или пробит. Используя такой алгоритм поиска, вы потратите гораздо меньше времени, чем потребовалось бы на 64 теста, которые пришлось бы выполнить, последовательно передвигаясь по всей цепи.

Далее, если бы выходной сигнал операционного усилителя перестал реагировать на изменения уровня входного сигнала, то, как обычно, вы стали бы проверять операционный усилитель, резисторы или проводники. И если заранее не подумать о том, что причиной отсутствия изменений выходного сигнала является пробой конденсатора, то вы наверняка не станете проверять конденсаторы.

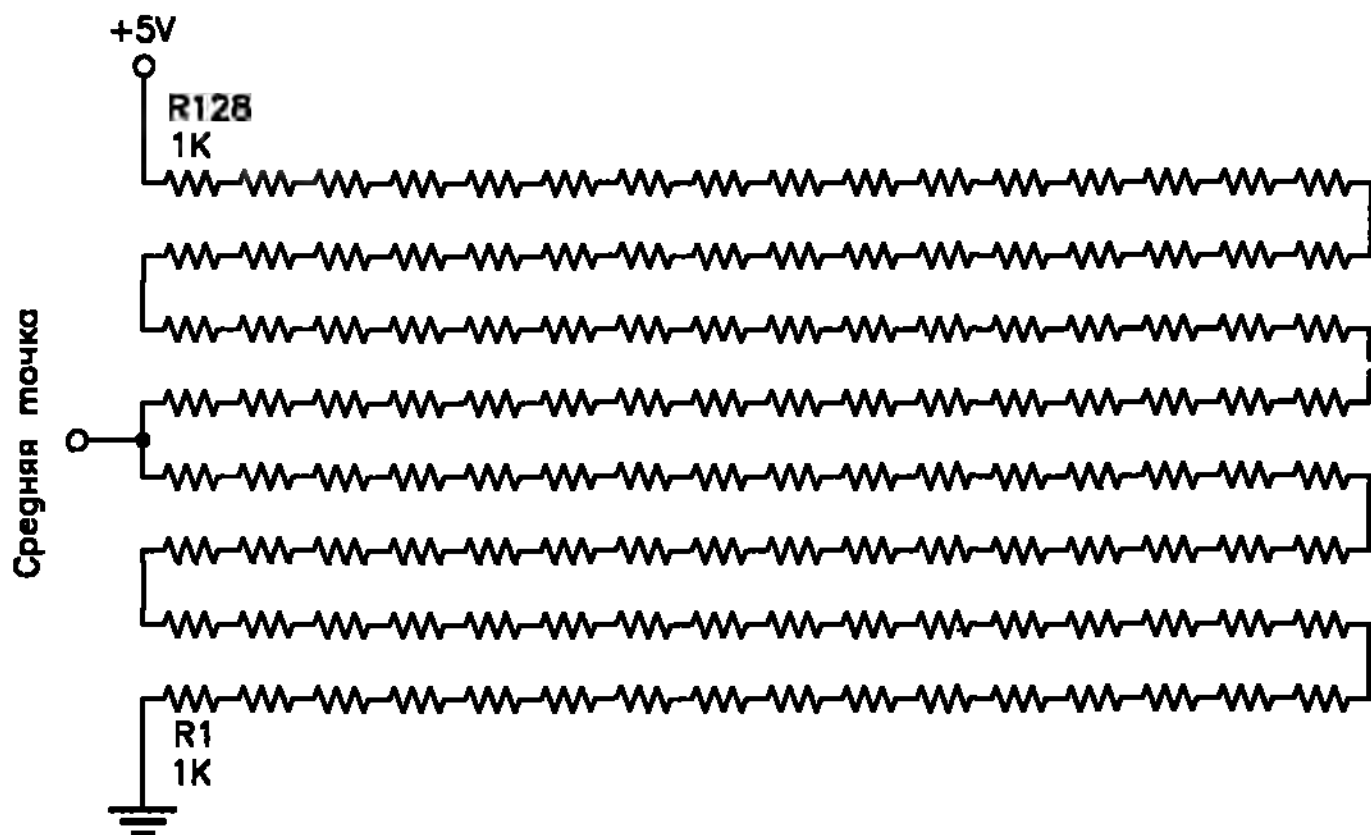


Рис. 1.2. Неисправность в сложном делителе

Если обнаружится, что напряжение в средней точке делителя составляет не 2,5 В, а 0 В, то как вы будете искать место замыкания или обрыва?

Примечание к рис. Все резисторы 1 кОм.

Наоборот, если ошибка в уровне выходного напряжения V_{out} будет составлять всего несколько десятков милливольт, то вы, вероятно, начнете проверять точность и номиналы резисторов. Но наверняка не станете искать конденсатор с обрывом или с неправильным номиналом, если не замерите осциллографом выходной сигнал схемы и не обнаружите, что она самовозбуждается!

Итак, при отладке любой схемы вам необходимо анализировать всю информацию — ваши «подсказки» — до тех пор, пока не придете к тому измерению, которое позволит выявить истинную причину проблемы.

Таким образом, всегда следует сперва сформулировать гипотезу, а затем придумать подходящий тест или серию тестов, результаты которых должны помочь вам сузить круг поиска неисправности и, возможно, подтвердить вашу гипотезу. Эти тесты должны быть выполнимы. Но может получиться так, что вы придумали тест, а затем выяснилось, что провести его невозможно или очень сложно. В таком случае я часто рассуждаю следующим образом: «Ну, если бы я мог провести этот тест, то получил бы в результате ответ либо «да», либо «нет». Итак, я не могу провести этот тест напрямую. Если предположить, что тот или иной ответ уже получен, что бы я стал делать после этого для дальнейшего поиска решения? Могу ли я пропустить этот этап и сразу переходить к следующему?»

К примеру, мне нужно снять данные с нижнего слоя металлизации в интегральной микросхеме с двумя слоями металлизации, но (так как я не предусмотрел переходы от важных узлов нижнего слоя металлизации к верхнему) можно провести вместо этого несколько других тестов. Я стал бы делать другие тесты в надежде, что мне, может быть, не придется проводить измерения непосредственно. А это было бы непросто, даже если бы удалось «позаимствовать» лазер для того, чтобы прорезать все слои оксида до нужного «металла». Если повезет, то мне, надеюсь, никогда не понадобится возвращаться к подобному «очень сложному или практически неосуществимому» измерению.

Иногда в результате тестирования получается совершенно невероятный результат, абсолютно не похожий на то, что ожидаешь получить. В таком случае следует подумать, в чем же ошибочны первоначальные предположения. Где ошибка в размышлениях? А правильно ли проведены измерения? Заслуживают ли доверия данные, подготовленные техниками? Все это делает поиск неисправностей захватывающим занятием – скучно практически никогда не бывает.

С другой стороны, глупо все планировать и ничего не проверять практически. Если вы так поступите, то наверняка запланируете ряд процедур, которые, как быстро покажут тесты, окажутся ненужными. Человека с таким подходом называют «аналитик-паралитик» (горе от ума). Действия и размышления очень важны, и я считаю, что время планирования должно соответствовать времени тестирования. Если тесты окажутся очень сложными и дорогими, то соответственно и планирование должно быть изощренным. Если тесты простые, как в случае со 128 последовательно соединенными резисторами, то можно тестировать их приблизительно так, как было предложено. К примеру, резисторы № 80, 112, 120, 104, 88 и 72 выбраны в математическом соответствии с обычным алгоритмом последовательного приближения (половинного деления). Но исследовать именно указанные резисторы необходимости нет – в данном случае вполне допустимо использовать приблизительное «половинное деление».

1.7. Пусть законы Мерфи работают на вас

В соответствии с одним из законов Мерфи часто могут нарушиться даже тщательно подготовленные планы: «Если что-то может быть плохо, то так оно и будет». Однако я знаю, как заставить эти законы работать на меня. К примеру, если возить с собой в машине огнетушитель и подготовиться к тушению любого пожара, то не следует ли из этого, что машина никогда не загорится? На первый взгляд идея вполне идиотская. Однако если я настолько предусмотрителен, что вожу с собой огнетушитель, то, вполне вероятно, что я буду достаточно аккуратен и смогу избежать поступков, которые приведут к пожару.

Размышляя подобным образом при разработке электронных схем, я делаю «запаски» в тех местах, где не могу точно предсказать, как будет работать цепь. При разработке макета устройства я часто говорю технику: «Выделите на *этот* участок места на 20% больше, чем необходимо, так как я не уверен, что здесь удастся обойтись без модификаций. И, пожалуйста, оставьте свободное место около *этого* резистора и *того* конденсатора, так как, возможно, мне придется заменить их деталями с другим номиналом». При разработке микросхемы я оставляю на поверхности кристалла микросхемы небольшие участки металлизации и соединяю с ними стратегически важные цепи разрабатываемого изделия, что позволяет предельно просто снимать характеристики его важнейших узлов.

Для того чтобы можно было снять характеристики при испытаниях микросхем с двумя слоями металлизации, я делаю выводы от узлов нижнего слоя на верхний с помощью межслойных переходов. Иногда, чтобы снять характеристики прямо с кристалла, я оставляю открытые участки при пассивации кристаллов на технологическом этапе Varox. Вопросы удобства тестирования особенно актуальны

для больших цифровых схем, но основные положения идеологии Design for Testability (проектирование с учетом дальнейших испытаний) не зависят от типа разрабатываемой схемы. Неприятности обойдут вас стороной, если вы подумаете о том, что может плохо работать и как этого избежать. Учитывая в процессе планирования все варианты, можно заставить законы Мерфи работать на себя. И не забывайте: паровозы Станьера подвело то, что *никак* не могло отказать. Своевременная предусмотрительность значительно сократит количество проблем, с которыми вам придется разбираться.

1.8. Выберите Царя проблемы

Несколько лет назад у нас в компании National было так много мелких раздражающих проблем с источниками опорного напряжения (ИОН), основанными на принципе напряжения запрещенной энергетической зоны, что я решил (в одностороннем порядке) объявить себя Царем Запрещенной Зоны. В соответствии с введенным главным правилом все успешно разработанные схемы источников, которые основаны на принципе запрещенной зоны кремния, должны были регистрироваться Царем для того, чтобы создать журнал удачных схем. Все схемы неудачной конструкции, причины отказов этих схем, а также способы устранения неисправностей также следовало регистрировать, что позволило бы избежать повторения старых ошибок. Все новые схемы представлялись Царю для того, чтобы он мог проверить их на наличие уже известных ошибок. Мы считаем, что на настоящий момент нам удастся выявить и исправить более 50% потенциальных ошибок еще до изготовления пластин, и оказываемся в выигрыше. В дополнение к имевшемуся монарху мы назначили Царя Начальной Установки, Царя Регулировки, Царицу Изменений Технических Описаний и обдумываем организацию других царств. В этом есть что-то от игры, однако если такие игры помогают предотвратить дорогостоящие ошибки, то это дело полезное.

Я не всегда был хорошим регулировщиком, однако уже много лет назад прошел свое настоящее «боевое крещение». Я разработал семейство модульных преобразователей данных. Мы должны были отгрузить 525 штук этих изделий, и какой-то идиот закупил всего 535 печатных плат для этого заказа.

Когда оказалось, что работает менее половины устройств, именно мне пришлось стать регулировщиком и заняться исправлением неполадок, так как больше никто не мог даже предположить, как можно их привести в порядок. Для этого понадобился осциллограф с самой устойчивой системой синхронизации и самый лучший цифровой вольтметр. Я засиживался за работой до глубокой ночи. Сделал по полдюжине копий и принципиальной схемы, и топологии печатной платы. На них отметил, какие значения напряжения постоянного тока должны быть, какой должна быть правильная форма сигналов переменного тока, и точки, в которых удобнее всего снимать осциллограммы основных сигналов. На небольших листочках я делал записи приблизительно такого содержания: «Если частота вдвое выше нормальной, то надо проверить транзистор Q17, который, по-видимому, вышел из строя, а если частота низкая, то надо посмотреть, нет ли короткого замыкания на шине В».

Я разобрался, где искать «коротыши», вызванные излишками припоя, где встречаются микротрещины в проводниках, «холодные пайки» и «плавающие контакты». Выявил неисправности и отправил устройства в ремонт на производство, прикрепив к каждому из них отдельный ярлык с подробным описанием того, что требовалось сделать. Вы думаете, что после возвращения из ремонта все устройства работали нормально? Некоторые действительно работали, а у некоторых все еще оставались дефекты, потребовавшие еще одной или даже двух доработок. «Синдром луковицы» какой-то: вы снимаете один слой и плачете, снимаете следующий и снова плачете... Работа была закончена, когда удалось починить все устройства, за исключением четырех. Я прошел адский курс обучения поиску неисправностей.

При обнаружении причины дефекта я прежде всего делал записи для того, чтобы убедиться в том, что дефект действительно устраняется после замены неисправной детали. Затем я передавал устройство аккуратному технику, который выполнял требующую точности работу по ремонту гораздо более тщательно, чем это мог бы сделать такой неряха, как я. И наконец, я рассылал записки в производственный отдел и службу контроля качества для того, чтобы сотрудники знали, что не надо использовать компонент того типа, который вызывал проблемы. При этом для подтверждения изменений я оформлял сообщения об их внесении в конструкцию. Очень важно всегда поддерживать бумаги в полном порядке, иначе подобный кошмар наверняка повторится и будет мучить вас снова и снова.

1.9. Документооборот как путь к успеху (или краху)

Я слышал похожую историю о том, как труднообъяснимая ошибка вызвала серьезные проблемы с надежностью партии неких устройств. Техник несколько дней бился над проблемой, пытаясь найти решение. Наконец, когда он пошел обедать, проблемой решил заняться инженер-проектировщик. Когда техник вернулся, то инженер заявил ему: «Я разобрался, в чем проблема: Q17 и R18 выбраны не совсем правильно. Я пойду пообедаю, а вы подготовьте сообщение о внесении изменений в конструкцию. Я вернусь и подпишу его». К сожалению, взаимопонимания между техником и инженером не было. Техник запутался и подготовил сообщение, неправильно указав модели деталей, которые требовалось заменить. Инженер, вернувшись с обеда, не стал внимательно читать бумагу, а просто подписал ее, после чего на две недели уехал в отпуск.

По возвращении он узнал, что все устройства были отремонтированы, залиты компаундом, отгружены заказчику и начали давать сбои при эксплуатации. Проверка сообщения о внесении изменений позволила выявить ошибку, но было поздно. Компания обанкротилась. Эта грустная история совершенно реальна. Не стоит оставлять без внимания работу с бумагами – ведь вы не хотите, чтобы с вами произошла такая же история.

1.10. Анализ отказа

Одна из причин необходимости поиска неисправностей в том, что при сбое от вас могут потребовать проанализировать отказ. Это еще один вид бумажной работы.

Написание подобного документа не доставляет удовольствия, но иногда это помогает уточнить возникшую проблему и сделать ее понимание более четким. Если бы клиент заставил нашего брата – инженера – в точности описывать то, что произошло и как он предлагает исправить неприятную ситуацию, то катастрофы, о которой мы рассказали, наверняка бы не произошло. После того как мне удастся выявить дефект, я обычно пишу короткий комментарий. Одна копия часто идет моему начальнику, так как он интересуется, почему решение данной проблемы отняло у меня столько времени. Другую копию я, как правило, передаю своим друзьям, которые занимаются похожими проектами.

Иногда я вывешиваю свои записи на стене, чтобы предупредить *всех* своих друзей; иногда высылаю копию производителю компонента, который является причиной неисправности. Активный обмен информацией позволяет избежать повторения уже решенных проблем.

После обнаружения дефектного компонента не выбрасывайте его сразу в мусорную корзину. Порой мне звонят клиенты и говорят: «Ваша интегральная схема уже некоторое время вызывает у нас такие-то сбои». Я спрашиваю: «А можете ли вы выслать мне детали, которые считаете дефектными?» А они отвечают: «Нет, мы их выбросили...» Не делайте этого, пожалуйста, так как часто возможность выявления дефекта в большом устройстве зависит от того, доступны или нет несколько неисправных деталей для изучения. Бывает, что при исследовании блока «неисправностей не обнаружено». И чаще случается именно так, а не наоборот. Так что, если вы скажете мне: «Пиз, твои непотребные операционные усилители не работают в моей схеме», – очень может статься, что на самом деле с ними все в порядке, а проблема заключается в неправильном включении, и если все детали уже в помойке, я не смогу оказать вам серьезную помощь. Не выбрасывайте их, пожалуйста, хотя бы первое время. А заодно промаркируйте их.

С неисправными деталями можно сделать вот еще что: их можно вскрыть и посмотреть, что творится внутри. Если интегральная схема заключена в металлический корпус, то иногда после нескольких минут работы с отверткой все становится ясно, как божий день. К примеру, работающий у вас техник говорит: «Этот операционный усилитель сломался сам по себе, а я просто сидел рядом, смотрел на него и ничего не трогал». А когда вы заглянете внутрь, то увидите, что один из проводников, соединяющих кристалл с выводами корпуса, как будто взорвался, испарился, хотя по схеме устройства к этому выводу подключена только пара резисторов по 10 кОм. Понятно, что пережечь такой проводник током, меньшим 300 мА, нельзя. Что-то, по-видимому, упало на соответствующий вывод и закоротило его на источник питания, который мог выдать ток силой в пол-ампера. Во многих случаях бывает полезно заглянуть внутрь радиодеталей. Когда перестает работать конденсатор или переменный резистор, я беру в руки молоток, пассатижи, боко-резы, ножовку и вскрываю бедную детальку просто для того, чтобы посмотреть, как красиво (или не очень) она сделана, и понять, в чем причина отказа. Но иногда я узнаю еще больше.

После того как я закончил осмотр и изучение и чертовски рассердился, что потратил кучу времени на некачественный компонент, я не знал, что с ним делать.

Обычно я его ВИДЛАРизирую. Что это? Вы просто кладете деталь на наковаленку лабораторных тисков и лупите по ней молотком изо всех сил до тех пор, пока она не рассыплется в пыль, так что вам даже не придется потом подметать за собой. Вы наверняка почувствуете облегчение. И будете точно знать, что эта деталь больше никогда вас мучить не будет. Это не шутка, так как если попался плохой конденсатор или потенциометр и вы просто отложили его в сторону, то может так случиться, что через несколько месяцев эта деталь снова попадет под руку, вы вставите ее в схему и потеряете время. Зато после того, как вы что-нибудь ВИДЛАРизируете, такого точно не произойдет. А обучил меня этому технологическому приему уже, к сожалению, умерший Боб Видлар (Bob Widlar)¹.

1.11. Ремонт по телефону – занятие тяжелое

Мне довольно часто приходится заниматься устранением неисправностей по телефону. Когда звонит телефон, я никогда заранее не знаю, что за проблема возникла у клиента. Может быть, клиент попросит меня дать ему небольшую консультацию или помочь решить проблему от обычной прикладной до сложной, а иногда и неразрешимой. Часто я могу дать совет не задумываясь, так как сталкивался с такой ситуацией. В других случаях, прежде чем перезвонить и сказать, в чем дело, мне приходится затратить некоторое время на изучение возникшей проблемы. Иногда вопрос настолько сложен, что я прошу клиента выслать мне по почте или передать каким-либо другим способом принципиальную схему всего устройства. Очень редко, но случается и так, что ситуацию трудно оценить, поэтому я прошу упаковать изделие вместе с принципиальной схемой и списком симптомов в коробку и переправить мне. Если клиент где-то недалеко, я просто заезжаю к нему по дороге домой, чтобы посмотреть, что же там на самом деле творится.

Иногда проблема вызвана всего лишь некорректностью пользователя. Иногда отдельные детали выгорают, и приходится гадать, что могло вызвать перегрузку. Вот, например, такая история.

Один производитель стоматологического оборудования пожаловался на недопустимо высокий процент отказов интегральных стабилизаторов LM317. После длительного обсуждения проблемы я спросил: «А где именно происходили отказы?» В ответ услышал: в Северной Дакоте. «А когда именно начались проблемы?» Выяснилось, что в феврале. Сложив два и два, я сообразил, что воздух в стоматологических кабинетах в Северной Дакоте в феврале практически сухой и вполне вероятно появление очень высоких электростатических потенциалов при движении. В нормальных условиях микросхемы LM317 выдерживают электрические разряды до 3–4 кВ, но при ходьбе по ковровому покрытию зимой в Северной Дакоте может образовываться статический потенциал *гораздо* большей величины. Осложнило ситуацию то, что реостат управления скоростью располагался непосредственно в ручке бормашины. Движок и один из выводов резистивного

¹ Роберт Видлар – американский специалист по микроэлектронике, пользующийся мировой славой, разработчик ставших классическими первых микросхем операционного усилителя, интегрального стабилизатора, буфера-повторителя и др. Отличался большим чувством юмора. До сих пор по всему миру рассказывают различные легенды и притчи о Видларе. Роберт Пиз был его подчиненным и учеником. – Прим. ред.

элемента этого реостата были подключены к микросхеме LM317, а другой вывод резистивного элемента реостата был заземлен через резистор номиналом 1 кОм, расположенный на печатной плате в основном блоке (рис. 1.3). Реостат управления скоростью был смонтирован так, что служил громоотводом, который передавал энергию электростатического разряда прямо на вывод ПОДСТРОЙКА.

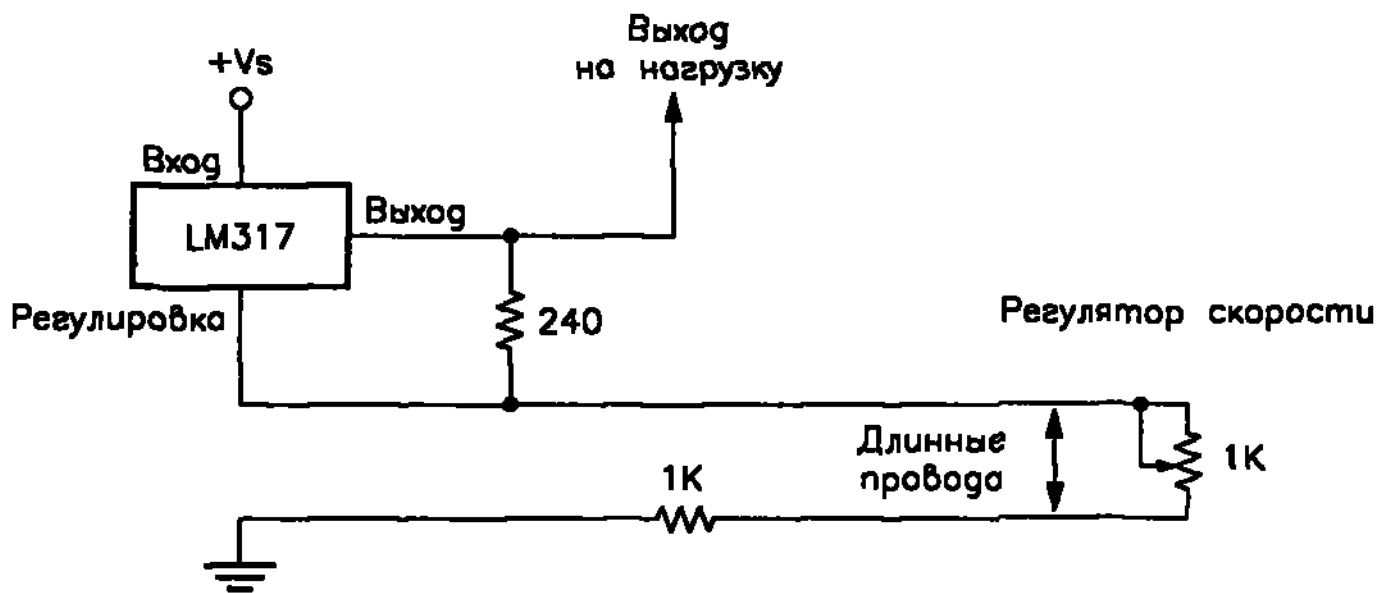


Рис. 1.3. Проблемная схема регулятора оборотов бормашины

Ток статического разряда течет через движок реостата прямо на вывод ПОДСТРОЙКА стабилизатора LM317.

Эту проблему удалось решить очень просто, подключив постоянный резистор и вывод ПОДСТРОЙКА последовательно. Поменяв провода местами и соединив движок реостата с землей (рис. 1.4), удалось добиться того, что через вывод ПОДСТРОЙКА стал протекать гораздо меньший ток и диффузионные резисторы перестали повреждаться или выходить из строя в результате бросков тока. Конечно, проблему можно было бы решить, добавив маленький конденсатор и заземлив через него вывод ПОДСТРОЙКА, но кое-кто из наших клиентов сообразил, что проще обосновать изменение схемы, а не добавление нового компонента...

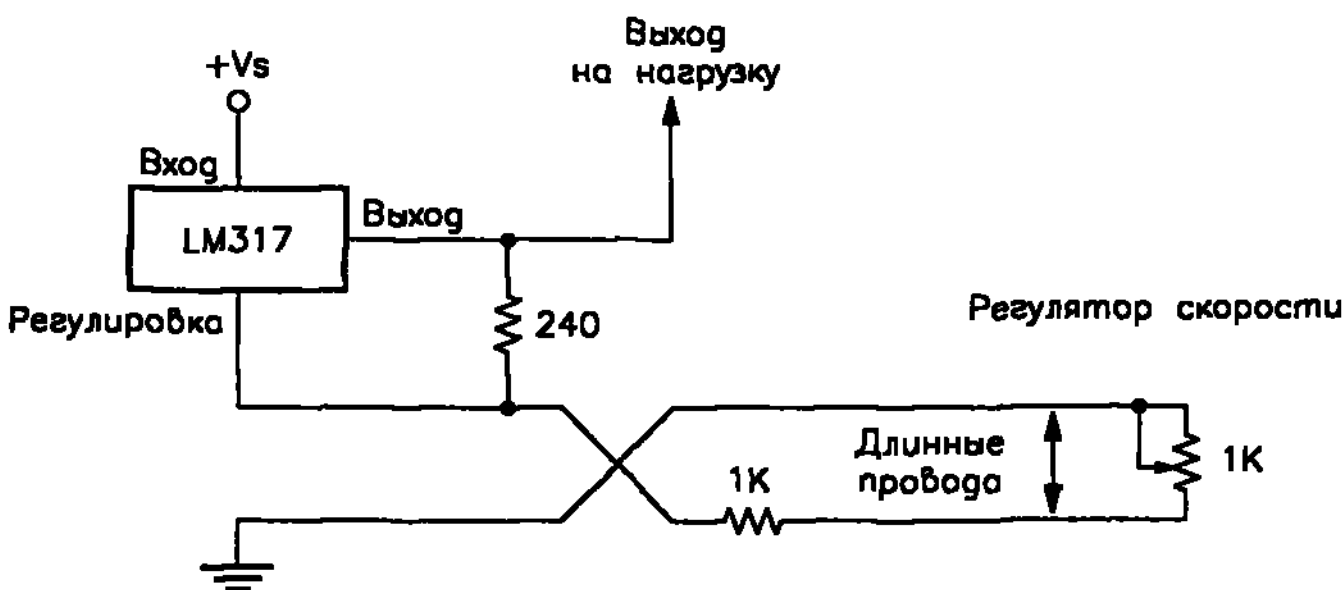


Рис. 1.4. Устранение проблемы в регуляторе оборотов бормашины

Если поменять местами два провода, то импульс тока разряда статического электричества уйдет в землю и не принесет вреда.

Похожая ситуация возникла, когда в июле мы получили жалобу из Бостона. В ней сообщалось, что «поставляемые вами операционные усилители не удовлетворяют требованиям по току смещения». Решение проблемы оказалось на удивление

простым: хорошая чистка водой с мылом лучше другого средства позволяет удалить загрязнения (следы рук, например), которые приводят к утечкам в условиях повышенной влажности. Подробнее об этом можно узнать из главы 5, в которой рассказывается о том, как с помощью посудомоечной машины очистить имеющую пробой печатную плату или «текущий», грязный корпус интегральной схемы.

1.12. Ремонтника компьютером не заменишь!

Теперь давайте подумаем, где нужно искать неисправности. В схемах? Телевизорах? Автомобилях? Людях? Очевидно, что много работы по поиску неисправностей у врачей – они выслушивают симптомы, а затем стараются поставить диагноз.

Каким в такой ситуации является самое естественное желание? Пусть всю работу делает компьютер! В конце концов он лучше всех «выслушает» жалобы и проанализирует симптомы, задаст мудрые вопросы и компетентно поставит диагноз. Такие компьютерные программы иногда называют экспертными системами – это часть более общего понятия «искусственный интеллект». Я тем не менее остаюсь поклонником *естественного интеллекта*. Люди, которые придерживаются иной точки зрения и полагаются на искусственный интеллект, могут решать определенного вида задачи, но никогда нельзя быть уверенным в том, что они смогли справиться со всеми проявлениями *тупости естественной* так же, как со всеми проявлениями *тупости искусственной*. (Это специальный вид тупости, придуманный для того, чтобы доказать, что *искусственный интеллект* ни в чем не уступает *естественному*.)

Я не буду говорить, что компьютер не приспособлен для такого рода работы. Вероятно, использование компьютера оправдывает затраты, кроме того, машина не отвлекается.

Однако я нервничаю при мысли, что если компьютеры будут выполнять всю рутинную работу, то вскоре при отказе машины некому будет думать о решении задачи. Надеюсь, мы не позволим оставить высококвалифицированных ремонтников без работы независимо от того, что они ремонтируют – электрические схемы или людей.

Мою озабоченность разделяет врач Николас Лембо (Nicholas Lembo), автор опубликованного в медицинском журнале Новой Англии (New England Journal of Medicine) исследования, посвященного тому, как врачи ставят диагноз.

Недавно он заявил газете Los Angeles Times, что «с появлением в медицине новых технологий не все врачи сохранили интерес (к дежурствам у постели больного), так как они могут отправить больного на тестирование за \$300–400, которое даст им ту же информацию, что и при беседе с пациентом». В редакционной

ZIGGY®



ZIGGY Copyright 1988 Ziggy & Friends/Dist. by Universal Press Syndicate. All rights reserved.

Рис. 1.5. Нужно сделать еще несколько анализов, но я абсолютно уверен, что это либо крокодил, либо аллигатор

статье, сопровождающей исследование, с грустью отмечается: «Наблюдаемая тенденция... может вскоре привести к тому, что у нас будет поколение молодых врачей, не уверенных в своих собственных способностях поставить диагноз прямо у постели больного».

Поиск неисправностей все еще является искусством, и очень важно поощрять тех, кто занимается этим.

1.13. Компьютер – ваш помощник, но друг ли...

В газете Chronical [5] я прочитал рассказ о том, что произошло, когда скандинавская авиакомпания SAS снабдила своих механиков экспертной системой. Руководство почувствовало, что что-то не так, когда качество ремонтных работ резко снизилось. Выяснилось, что механики настолько доверяли автоматизированной системе, что ни разу не подвергли сомнению предлагаемые ею решения. Исходя из этого, переделка экспертной системы велась с учетом замечаний механиков. Основные решения они принимали прямо в цехах, а компьютер использовался только для контроля и дополнения этих решений. «Компьютер никогда не сможет учесть всех факторов, – заявил один из механиков, – теперь, когда возросла потребность в моем мнении, работа стала намного интереснее».

Что к этому можно добавить? Просто старайтесь думать.

1.14. Нет проблем? Ах, нет проблем! Будут!..

Давайте сейчас заглянем вперед и предположим, что у нас есть все необходимые инструменты и мы соответствующим образом настроились на поиск неисправностей. Что еще требуется? Какого последнего компонента не хватает?

Мне вспоминается история об одной маленькой девочке, которую в воскресной школе спросили, что нужно сделать для того, чтобы получить отпущение грехов. Она застенчиво ответила: «Прежде всего нужно согрешить». Так что, прежде чем заниматься поиском неисправностей, надо чтобы что-то не работало. Однако обычно это не проблема, достаточно подождать несколько часов... Согласно закону Мерфи, если вы не подготовились к сбоям, то они непременно произойдут в большом количестве. И наоборот, если вы заранее подготовитесь, то, возможно, избежите большей части потенциальных проблем.

Я попытался сформировать у вас некоторое понимание философского подхода к поиску неисправностей. Не верьте, что в конкретной ситуации вам поможет только один конкретный человек. В каждом отдельном случае трудно предсказать, кто же предложит верное решение. Исходя из этого, если ваш товарищ окажется в беде и ему будет нужна помощь, то попробуйте что-нибудь сделать – быть может, в этот раз героем станете именно вы. И даже если ваше предложение окажется неверным, то, когда выяснится правильное решение, вы добавите еще одну монетку в вашу копилку хитростей.

Если у вас возникает проблема, попробуйте составить надежный план, как атаковать ее и «прижать» к стене. Если начинаются перемежающиеся сбои – а это самый неприятный вид неисправностей, – то и на этот случай есть кое-какие советы

(см. главу 12). Итак, если вы выполнили «домашнее задание по философии», то ваша жизнь станет легче и приятнее. Вы сможете не только решать возникающие проблемы, но и, скорее всего, избегать их. И эта мысль мне очень нравится!

Литература

1. Dostal, Jiri, *Operational Amplifiers*, Elsevier Scientific, The Netherlands, 1981; а также Elsevier Scientific, Inc., 655 Avenue of the Americas, NY, NT 10010. (212) 989-5800.
Имеется русский перевод: Достал И. Операционные усилители. – М.: Мир, 1982.
2. Smith, John I., *Modern Operational Circuit Design*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1971.
3. *Data Converter Handbook*, Analog Devices Corp., P.O. Box 9106, Norwood MA 02062, 1984.
4. Bulleid, H. A. V., *Master Builders of Steam*, Ian Allan Ltd., London, UK, 1963, с. 146–147.
5. Caruso, Denise, “Technology designed by its users”, The San Francisco *Examiner*, с. E-15, Sunday, March 18, 1990.

2. ПОДБОР ИНСТРУМЕНТАРИЯ

Как было отмечено в главе 1, для эффективного поиска неисправностей важнее всего ваше умение думать. Однако, помимо интеллекта, безусловно, понадобятся кое-какие приборы и инструменты. В этой главе приведен список оборудования для решения наиболее распространенных задач по поиску неисправностей. Часть этого оборудования можно приобрести, а часть придется изготовить самостоятельно.

Прежде чем начинать поиск неисправностей, нужно понять: от того, каким оборудованием вы пользуетесь, напрямую зависят затраты времени и сил, необходимые для решения поставленной задачи. Кроме того, конкретно набор приборов, необходимых для качественного выявления и исправления дефектов, определяется типом схемы или устройства, над которыми вы работаете. К примеру, цифровой вольтметр может не понадобиться при ремонте отдельных неисправностей в чисто цифровых схемах или системах. Серьезные затруднения могут возникнуть при недоступности оборудования или неудобстве его использования. Если в вашем распоряжении только осциллограф среднего класса и фирма, в которой вы работаете, не может купить или арендовать сложный многофункциональный прибор, то придется обходиться имеющимся.

Если у вас не хватает какого-либо оборудования, то необходимо отдавать себе отчет, что вы приступаете к делу недостаточно подготовленным. Возможно, в этом случае для того, чтобы выявить отдельные признаки неисправности, потребуется гораздо больше времени. Часто случается, что на незначительную проблему уходит очень много времени. Причинами могут быть ваше недопонимание либо плохое знание конкретных особенностей технологии поиска. Однако бывает, что пустые затраты времени – результат отсутствия необходимого оборудования. Очень важно своевременно оценивать такие случаи. Обретая опыт в поиске неисправностей, вы научитесь распознавать ситуации, в которых время было затрачено попусту из-за недостаточной оснащенности оборудованием.

Помимо наличия правильно подобранного оборудования необходимо также четкое понимание работы и исследуемой схемы, и измерительного оборудования.

Я уверен, вам знакома ситуация: инженер или техник часами безрезультатно бьется над проблемой, а когда решение в конце концов найдено, восклицает: «О, я не знал, что эта штука должна так работать!» Можно избежать подобных ситуаций, используя удобное и знакомое вам оборудование.

Ниже перечислены приборы, необходимые для поиска неисправностей в аналоговых схемах. Этот список можно использовать как руководство и для оборудования лаборатории, и для выявления недостающих приборов:

1. Двухлучевой электронный осциллограф. Наиболее удобна модель, чувствительность которой 1 или 2 мВ/см, а ширина полосы пропускания не меньше 100 МГц. Даже если вы работаете с «медленными» операционными усилителями, лучше использовать широкополосный осциллограф. Некоторые транзисторные каскады в «медленных» устройствах могут самовозбуждаться на частотах 80–160 МГц, и необходимо иметь возможность увидеть эти небольшие «взвизги». Для поиска неисправностей в быстродействующих схемах вам, безусловно, может понадобиться самый быстродействующий осциллограф в лаборатории. Режим автоматической развертки в ряде случаев поможет сэкономить время и выполнить работу наиболее эффективно. Убедитесь, что вы знаете, как работают все органы управления, чтобы не пришлось тратить время на настройку и бороться с ложными срабатываниями.
 2. Два или три щупа для осциллографа. Они должны быть в хорошем состоянии и обладать соответствующими наконечниками, фиксаторами и др. Переключаемые щупы 1:1, 1:10 можно использовать для контроля как очень больших, так и очень малых сигналов. Но необходимо учитывать, что щупы 1:1 даже при использовании с осциллографами 100 МГц имеют ширину полосы пропускания всего лишь 16 или 20 МГц. При использовании щупов 1:10 не забудьте скомпенсировать емкость щупа по прямоугольному сигналу с помощью калибратора (рис. 2.1). Невозможность проведения подобной регулировки может стать причиной потери огромного количества времени. В идеале нужно иметь три щупа. Тогда можно использовать один из них для подачи сигнала синхронизации и по одному щупу для каждого канала. Чтобы решать практически любые задачи поиска неисправностей, у щупов должен быть длинный вывод, однако для наблюдения сигналов в быстродействующих устройствах придется заменить длинный вывод заземления коротким (рис. 2.2). Более короткие выводы не только расширяют полосу рабочих частот щупа, но и менее восприимчивы к внешним наводкам и шумам. Для работы с некоторыми высокоомными цепями может не подойти входная емкость даже щупа 1:10, которая обычно составляет 9–15 пФ. Для этих целей нужен активный щуп с еще меньшей входной емкостью, 1,5–3 пФ. Его можно купить (в зависимости от модели он стоит \$395–1800) или сделать самостоятельно (рис. 2.3).
- Если предстоит работа с импульсными стабилизаторами, то нужно обзавестись парой щупов для измерения силы тока. Они позволяют определить, какие токи текут в отлаживаемой схеме. Некоторые из таких щупов можно использовать для измерения силы даже постоянного тока, остальные (гораздо более дешевые) – только переменного.

3. Аналоговый запоминающий осциллограф. Такой прибор особенно полезен при исследовании случайных или кратковременных сигналов. Он позволяет запускать развертку непосредственно в момент наступления события, которое происходит очень редко, и сохранять в памяти изображение сигнала как этого события, так и проходящего вслед за ним. Запоминающие осциллографы могут работать нестабильно, некоторые из них сложны в эксплуатации, но стоит приложить дополнительные усилия, чтобы научиться ими пользоваться. Цифровые запоминающие осциллографы позволяют применять те же способы запуска развертки и хранения информации о событиях, что и аналоговые, и, вдобавок к этому, отдельные модели сохраняют информацию о состоянии, предшествующем запуску. Такие осциллографы представляют собой цифровые следящие системы, поэтому вы должны быть уверены, что правильно интерпретируете результаты их работы [1]. Научившись пользоваться запоминающими осциллографами, вы оцените уникальные функциональные возможности этих приборов, в частности яркие дисплеи на электронно-лучевых трубках, автоматическое измерение параметров импульса, а также возможность копирования изображения с экрана на твердый носитель.

Предположим, что на выходе усилителя или компаратора должны быть прямоугольные импульсы, а выходной сигнал имеет вид (а) или (b). Сколько времени понадобится, чтобы выяснить, в чем дело? Тут и думать нечего: покрутите подстроечный конденсатор компенсации на щупе 1:10 так, чтобы выходной сигнал со щупа имел вид (с) – плоскую вершину на всех частотах. Принципиальная схема обычного 1:10 щупа для осциллографа (d).

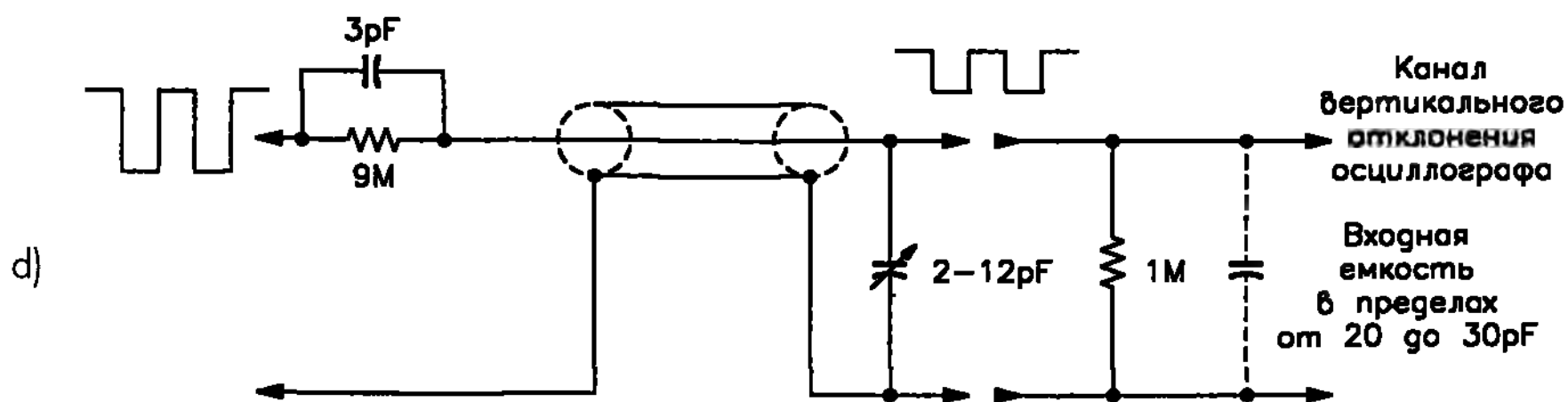
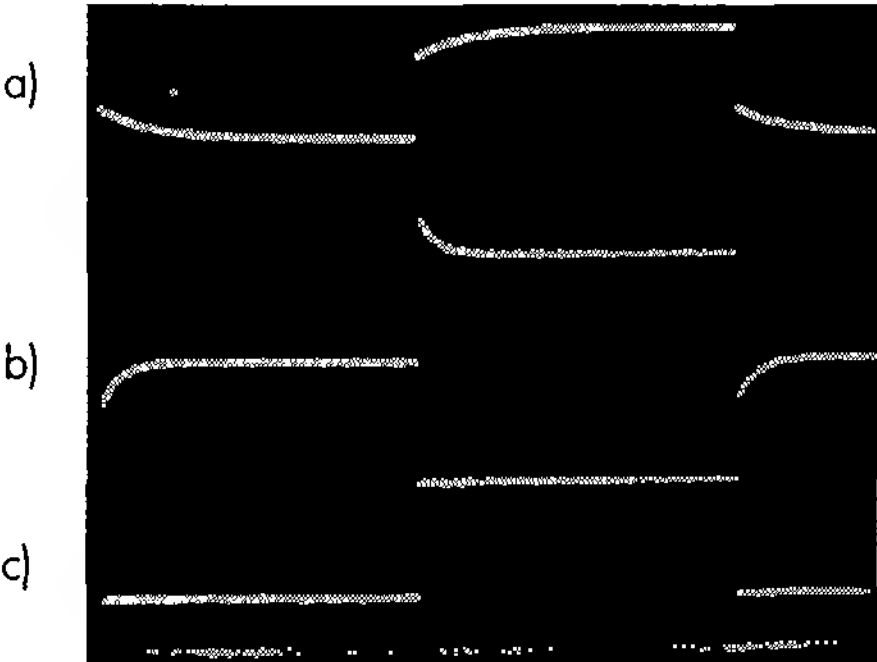


Рис. 2.1. Стандартный щуп 1:10 для осциллографа

4. Цифровой вольтметр. Выбирайте прибор из таких, как HP3455, HP3456, Fluke 8810A или Fluke 8842A, с разрешением не менее чем пять знаков. Обязательно отключайте режим автоматического переключения пределов, при

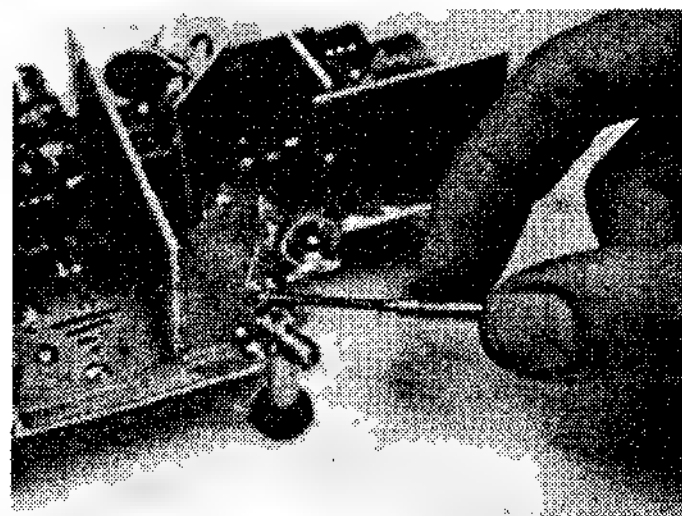
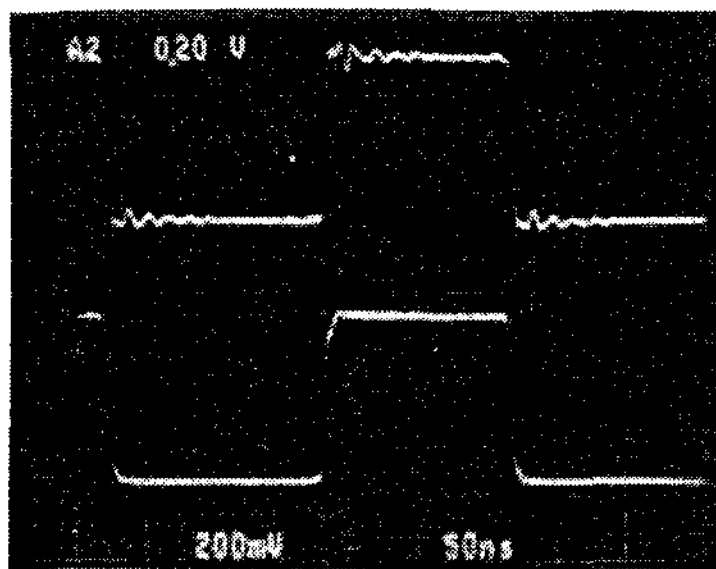
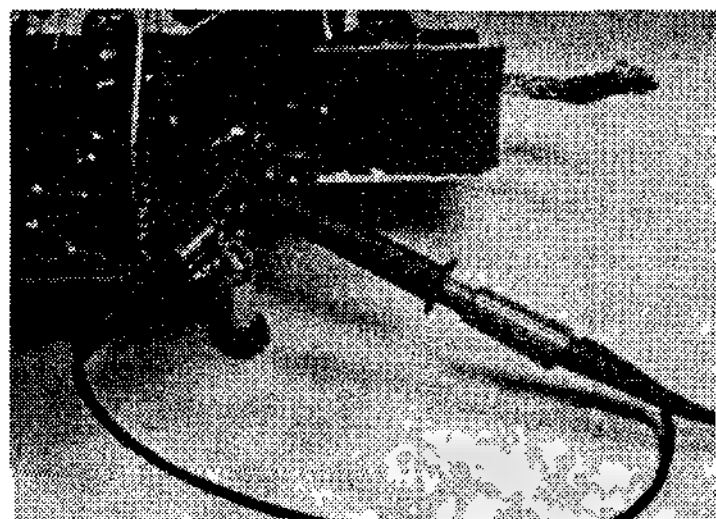


Рис. 2.2. Влияние щупа на результаты измерений



Если короткий прямоугольный сигнал должен иметь правильную форму и быстро устанавливаться, но выглядит он так, как показано на осциллограмме (а), то не стоит ремонтировать и калибровать генератор прямоугольных импульсов — просто отключите 6-дюймовый вывод заземления щупа (с). Если заземлить щуп на земляной шине в непосредственной близости от наконечника щупа (d) (для этого можно приобрести специальные разъемы и соединения), то наблюдаемые сигналы будут иметь значительно лучшую форму (b).

этом точность и скорость измерений максимальны. В противном случае придется впустую тратить время на автоматический выбор вольтметром предела. При работе со многими аналоговыми схемами необходимо, чтобы входное сопротивление вольтметра было высоким ($> 10\,000\text{ МОм}$) и сохранялось на этом уровне до 15–20 В. Все приведенные модели вольтметров удовлетворяют этому требованию. Выпускается много моделей цифровых вольтметров, входное сопротивление которых равно 10 МОм на пределах выше 2–3 В. Если вас не смущает входное сопротивление, равное 10 МОм, то такое устройство приобрести легко. Основная причина обязательного использования цифровых вольтметров с высоким входным сопротивлением в том, что иногда нужно подключить последовательно с щупом и в непосредственной близости от исследуемой цепи резистор номиналом 33 или 100 кОм в целях предотвращения возможного самовозбуждения, вызываемого входной емкостью вольтметра. Если использовать цифровой вольтметр с входным сопротивлением, равным 10 МОм, когда последовательно с щупом включен резистор сопротивлением 10 кОм, то точность измерений вольтметра упадет на 1%. К счастью, у большинства высококачественных вольтметров входной ток не превышает 500 пА, а это означает, что при сопротивлении источника 100 кОм ошибка составит не более 50 мкВ. Высокоточные цифровые вольтметры позволяют фиксировать отклонения 100–200 мкВ при уровне основного сигнала 11 В. Разбираться с разнообразными неполадками полупроводниковых схем проще, если фиксировать все незначительные отклонения. Четырехразрядный вольтметр — это прибор с относительно слабыми возможностями. Если другого прибора нет, то мелкие колебания напряжения можно будет выявлять, подключив к «минусу» стабильный источник опорного

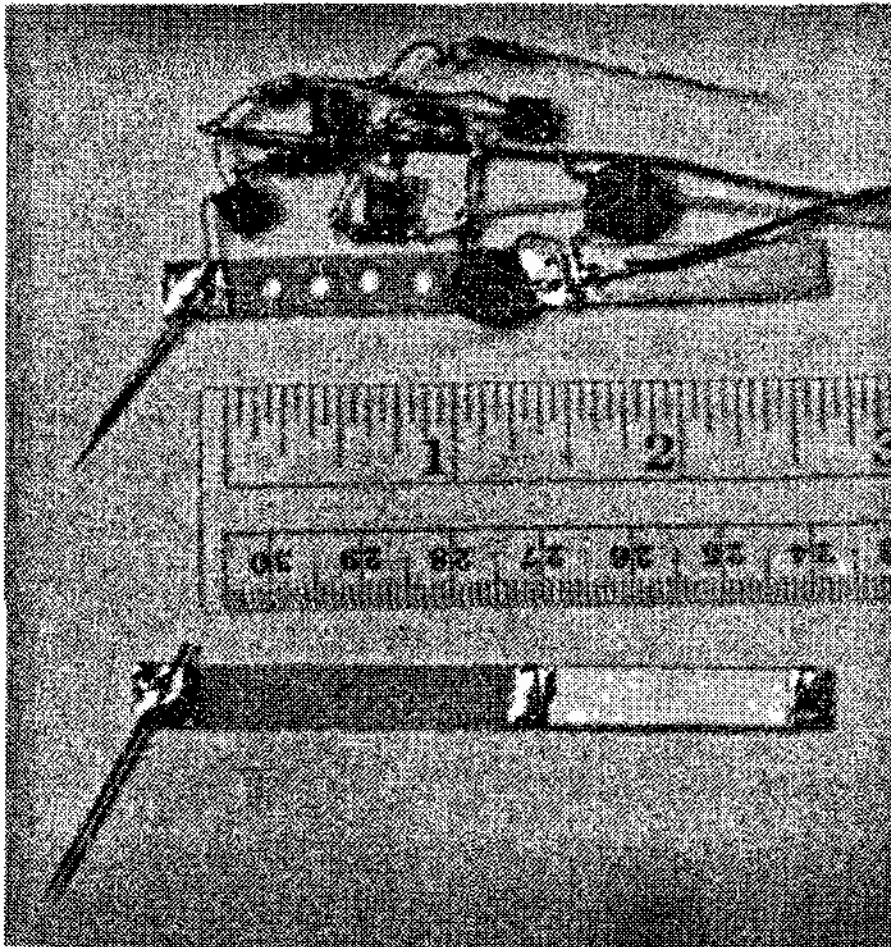
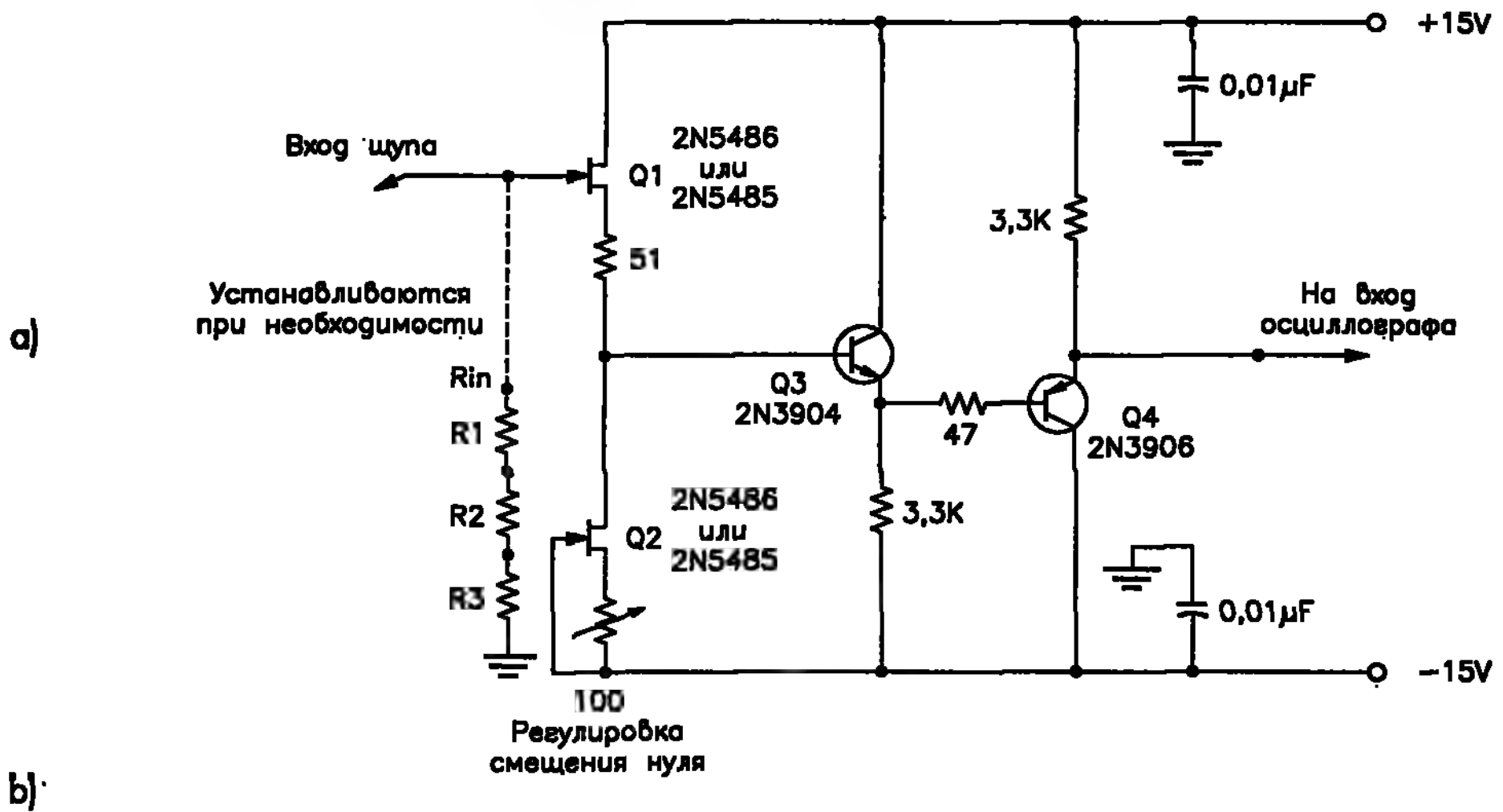


Рис. 2.3. Активный щуп

Входное сопротивление щупа схемы (a) составляет 10^{11} Ом, а входная емкость — 0,29 пФ. Этот щуп оптимизирован не по ширине полосы рабочих частот, а по входному сопротивлению, поэтому полоса частот щупа и скорость нарастания составляют соответственно 90 МГц и 300 В/мкс. Если вам покажется, что корпус типа TO-92, в котором выпускаются сдвоенные полевые транзисторы, недостаточно удобен для использования его в качестве каркаса щупа, то пластина из стеклотекстолита толщиной 1,58 мм со снятой медной фольгой позволит увеличить жесткость конструкции, а емкость щупа возрастет всего на 0,08 пФ. Если использовать пластинку с высверленными отверстиями (b), то входная емкость увеличивается всего на 0,06 пФ.

Примечание к рис. $Q1 = Q2 = 2N5486$ или $2N5485$, $R1 = R2 = R3 = 10$ МОм (у этого составного резистора общим сопротивлением 30 МОм паразитная емкость составляет приблизительно 0,08 пФ).

напряжения, например 10 В. В таком случае небольшие колебания сигнала напряжением 1 В можно измерять на пределе 1 В, что позволяет их зафиксировать. Проведение измерений таким способом менее удобно и более трудоемко, чем измерение относительно «земли» более точным вольтметром. Кроме того, при использовании этого метода велика вероятность возникновения дополнительных проблем. К примеру, на шину, напряжение на которой должно составлять в точности 10 В, могут наводиться помехи, возникающие при работе аналого-цифрового преобразователя вольтметра. А это оказывает неблагоприятное воздействие на работу других цепей. В определенных случаях его можно минимизировать с помощью небольших

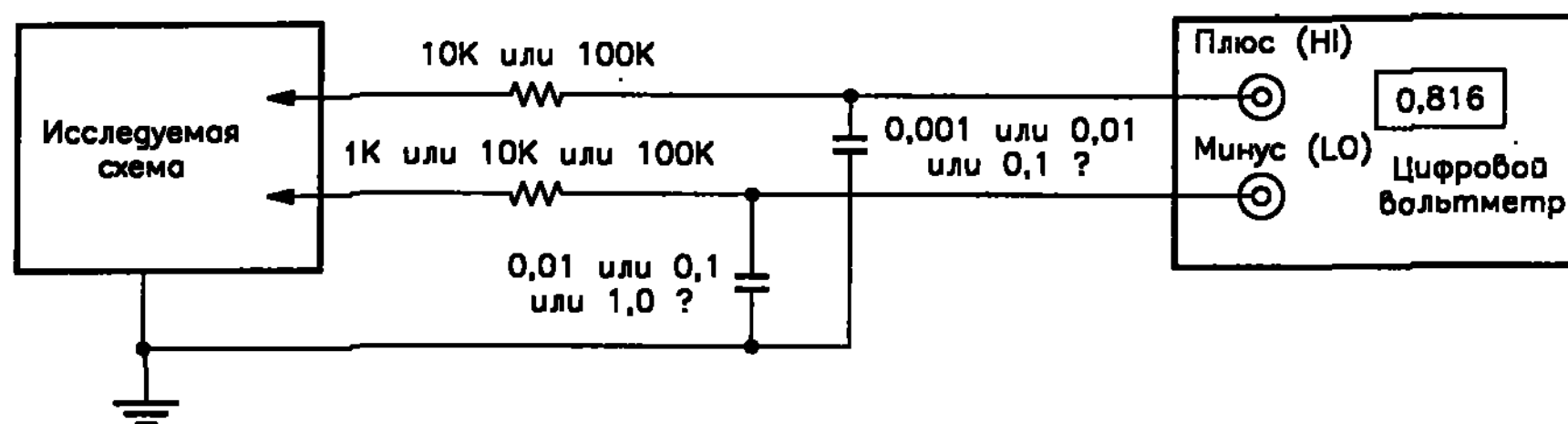


Рис. 2.4. Дополнительный фильтр для цифрового вольтметра

Цифровой вольтметр может вносить помехи в исследуемую высокочувствительную схему даже в том случае, если работает на батарейках. Минимизировать эти помехи помогут показанные на схеме RC-фильтры, однако их параметры придется подбирать для каждой схемы индивидуально.

RC-фильтров (рис. 2.4), но нельзя заранее предугадать, насколько сложно будет привести уровень таких помех к приемлемому...

5. Вспомогательные приборы. Может показаться странным вид экспериментальной установки, состоящей из двух качественных цифровых вольтметров, двух небольших трехразрядных приборов, контролирующих несколько источников напряжения, еще нескольких трехразрядных устройств, следящих за потреблением тока, и стрелочного прибора, контролирующего еще что-то. Однако если точно не известно, что искать и при этом есть возможность позаимствовать дополнительное оборудование, то использование большого количества измерительных приборов – лучший способ решения проблемы. Стоит пойти и на это, даже если приходится ждать конца рабочего дня, чтобы взять приборы. В каких случаях стрелочный прибор предпочтительнее цифрового? У стрелочного вольтметра обычно небольшая точность и невысокое разрешение, но, наблюдая за стрелкой вольтметра, можно проследить тенденцию или скорость изменения величин. Это было не столь наглядно при использовании цифрового прибора, особенно если сигнал зашумлен или нестабилен. Например, если коснуться выводов конденсатора емкостью 1 мкФ щупами обычного стрелочного вольтметра, то сразу можно определить, меньше или больше его емкость номинала в 10 раз. Произвести подобного рода проверку с помощью цифрового вольтметра не удастся. Еще одно преимущество стрелочных измерительных приборов в том, что это пассивные устройства: они не вносят помех и у них значительно меньшая емкость относительно земли, в отличие от цифровых приборов, которые «шумят», даже если работают от батарей.
6. Универсальный функциональный генератор. Хотя для испытаний широко используются синусоидальные и прямоугольные сигналы, в моей практике треугольные сигналы часто оказывались незаменимы при поиске различных нелинейностей. Иногда могут потребоваться два функциональных генератора. Один для того, чтобы медленно перемещать рабочую точку испытуемого устройства от верхней до нижней границы рабочего диапазона и обратно. При этом на выходе устройства надо контролировать его реакцию на малый высокочастотный прямоугольный входной сигнал, следя за появлением самовозбуждения, «звона» или сбоя.

7. Стабильные источники питания. Эти устройства должны иметь средства грубой и точной регулировки, а также возможность установки ограничения уровня тока. Чаще всего дискретные органы управления не всегда подходят, так как они не позволяют плавно уменьшать или увеличивать напряжение, одновременно следя за изменениями в работе схем по показаниям осциллографа. Если выходной конденсатор источника питания вызывает проблемы, то наверняка захочется приобрести источник питания, выходная цепь которого, подобно выходному каскаду операционного усилителя, не содержит конденсаторов. Вы можете купить подобный источник питания или сделать его самостоятельно, используя для этого операционный усилитель и несколько транзисторов. Преимущество источника питания, изображенного на рис. 2.5, в том, что его можно спроектировать с отличными импульсными характеристиками. (Для повышения скорости используйте быстродействующий ОУ типа LF356 вместо медленного LM741.) Кроме того, если исследуемая схема защелкнется и закортит источник питания, то саморазрушения этой схемы в результате разряда конденсатора большой емкости не произойдет. Раз уж мы затронули тему питания, то упомянем еще одно средство, применяемое для поиска неисправностей, – блок батарей. Можно использовать набор из одной, двух или четырех 9-вольтовых батарей, никель-кадмиевых, щелочных или любых других первичных источников питания, подходящих и доступных для ваших целей. Батареи могут служить альтернативным источником питания для малошумящих предусилителей: если уровень шумов в выходном сигнале предусилителя не снизился после замены обычного источника питания на батареи, то не стоит винить питание во всех проблемах разработанной схемы. Батареи также можно использовать для питания и других малосигнальных устройств, к примеру запаянных в металлические корпуса, не загрязняя их сигналы какими-либо внешними источниками шума.
8. Несколько RC-магазинов. Можно приобрести устройство VIZ Model WC-412A, которое я с любовью называю «шарманкой» (рис. 2.6), у компании R&D Electronics (1432 South Main Street, Milpitas CA 95035, (408) 262-7144). Или же навести справки непосредственно в компании VIZ (175 Commerce Drive, Fort Washington, PA 19034, (800) 523-3696). Этот блок разрешается использовать в следующих режимах: R, C, R и C последовательно и параллельно, разомкнутая цепь, короткозамкнутая цепь. Эти магазины незаменимы для определения причины неполадок и при проведении разнообразных испытаний. Вам могут понадобиться блоки, параметры которых выходят за пределы значений, обеспечиваемых «шарманкой». У себя в лабораториях мы собрали несколько примитивных вариантов таких магазинов (рис. 2.7). Схема, показанная на рис. 2.7а, позволяет использовать небольшие переменные значения емкости и полезна при работах по устойчивости операционных усилителей и других требующих аккуратного обращения схем. Вы можете самостоятельно сделать шкалы и оттарировать их в соответствии с конкретными значениями емкости и сопротивления.

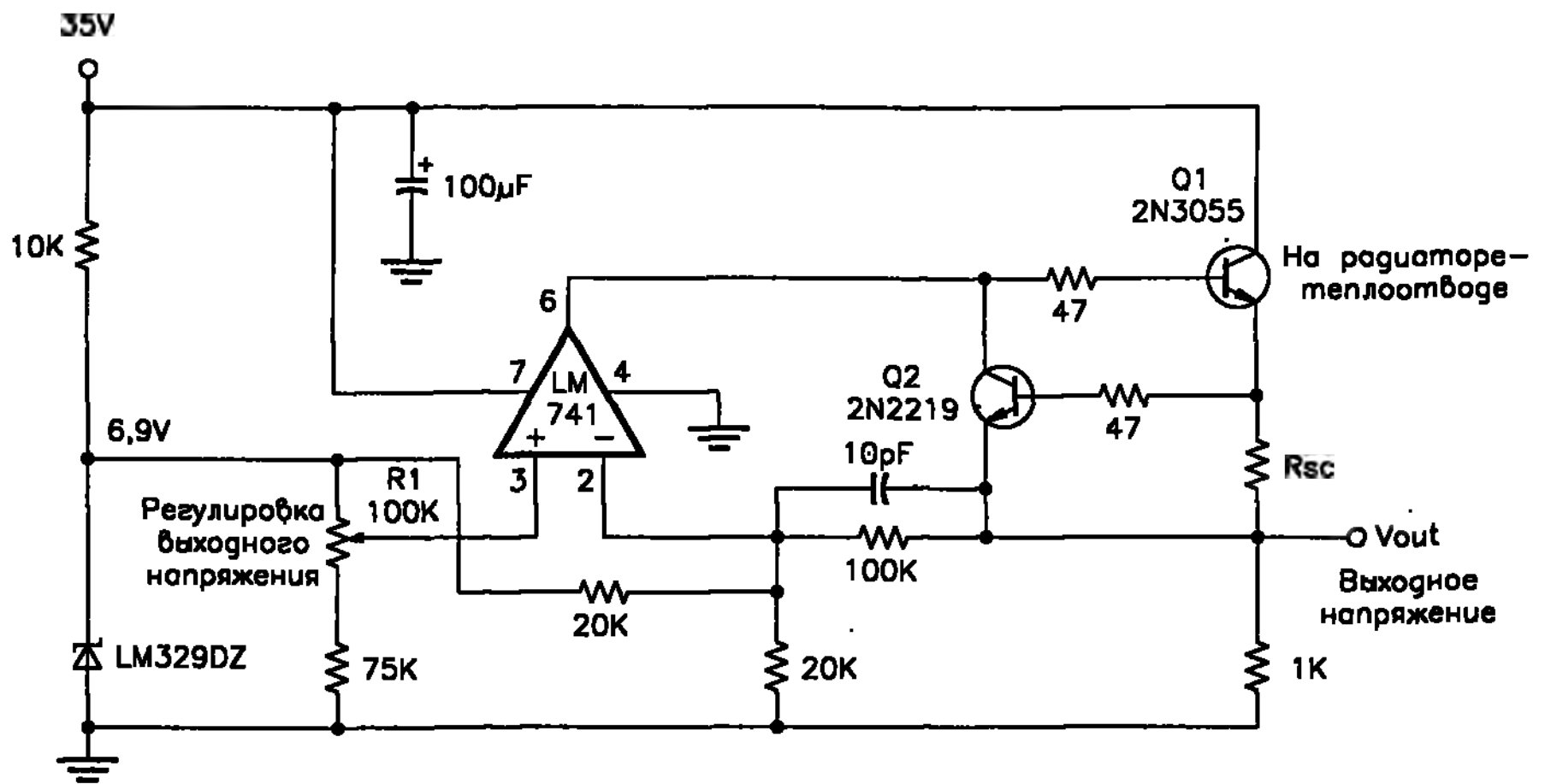


Рис. 2.5. Специальный источник питания

Выходное напряжение этого источника питания можно варьировать в диапазоне 3–30 В, изменяя положение движка потенциометра R_1 . Величина R_{sc} должна быть в пределах 3–100 Ом; ток короткого замыкания – приблизительно $20 \text{ мА} + 600 \text{ мВ} / R_{sc}$.

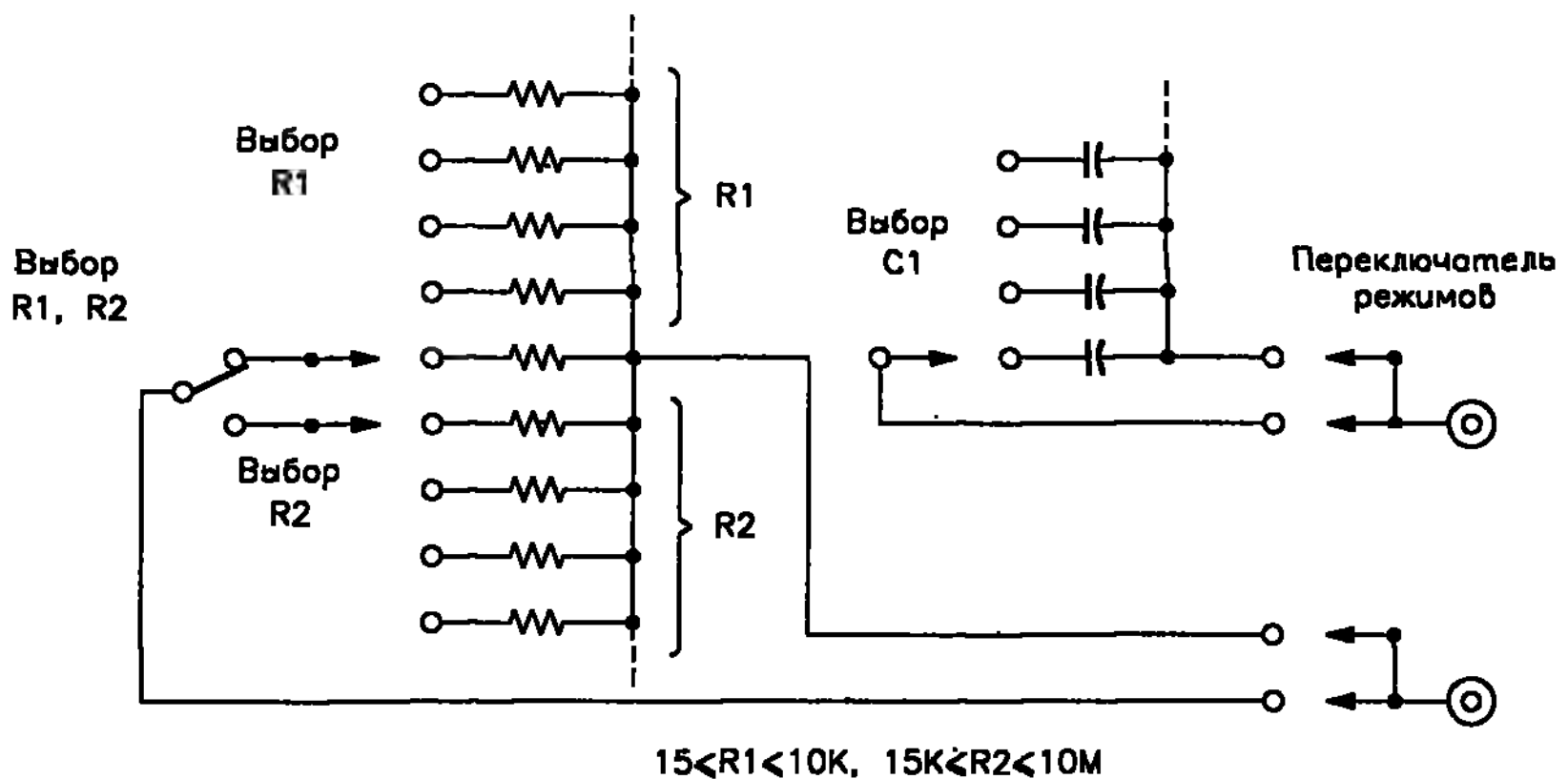


Рис. 2.6. Магазин емкостей и сопротивлений

Общая схема имеющегося в продаже RC-магазина VIZ Model WC-412A. Значения сопротивления и емкости изменяются от 15 Ом до 10 МОм и от 100 пФ до 0,22 мкФ соответственно. Блок может использоваться в следующих режимах: разомкнутая цепь, последовательная RC-цепь и резистор, конденсатор, параллельная RC-цепь, короткозамкнутая цепь.

9. Изолирующий трансформатор. Если вы работаете с питающимся от сети импульсным стабилизированным преобразователем, то такой трансформатор поможет избежать опасного для жизни и недопустимого на проверяемом

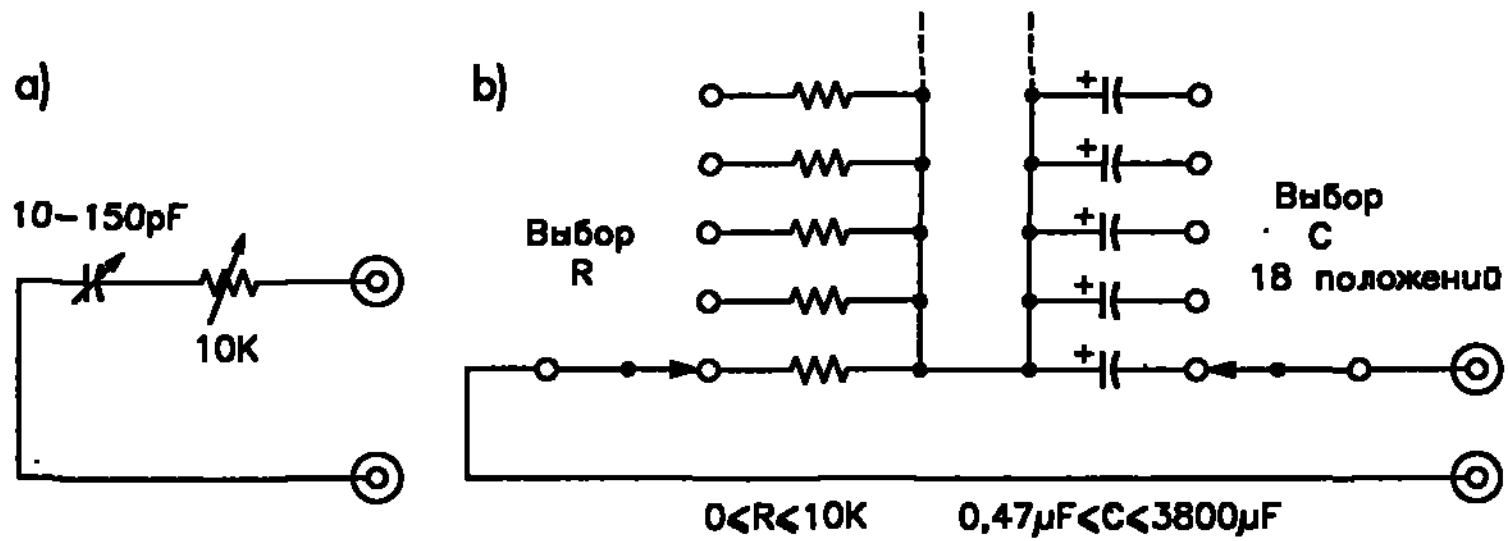


Рис. 2.7. Самодельные RC-магазины

RC-магазины, выполненные по предлагаемым схемам, имеют более широкий по сравнению с готовыми моделями диапазон изменения величин. Вы можете поместить последовательную RC-цепь (а) в коробочку из фольгированного стеклотекстолита размером 1×1×2 дюйма (2,5×2,5×5 см). Для изготовления этого блока используйте что-то вроде небольшого переменного конденсатора с пленочным диэлектриком и небольшой однооборотный потенциометр. При сборке второго устройства (б) для конденсаторов с номиналом 1 мкФ и больше используйте танталовые или электролитические конденсаторы, но не забудьте обратить особое внимание на полярность их подключения. Возможно, вы решите применять также пленочные конденсаторы для небольших номиналов. Иногда очень полезно сравнить пленочные конденсаторы с танталовыми и алюминиевыми электролитическими одинакового номинала! Для выбора величины сопротивления и емкости используются переключатели на 18 положений. И воздержитесь от использования проволочных резисторов, так как у них очень большая собственная индуктивность.

устройстве или на корпусе осциллографа напряжения. Если возникнут проблемы с приобретением изолирующего трансформатора, то можно воспользоваться парой трансформаторов (понижающий и повышающий), подключенных навстречу (рис. 2.8). Или же, если цена не является определяющим фактором, можно использовать изолированные пробники. С помощью таких пробников разрешается исследовать малые сигналы в цепях, находящихся под напряжением в сотни вольт относительно земли, и при их использовании не придется надевать изолирующие перчатки, чтобы переключить режим осциллографа.

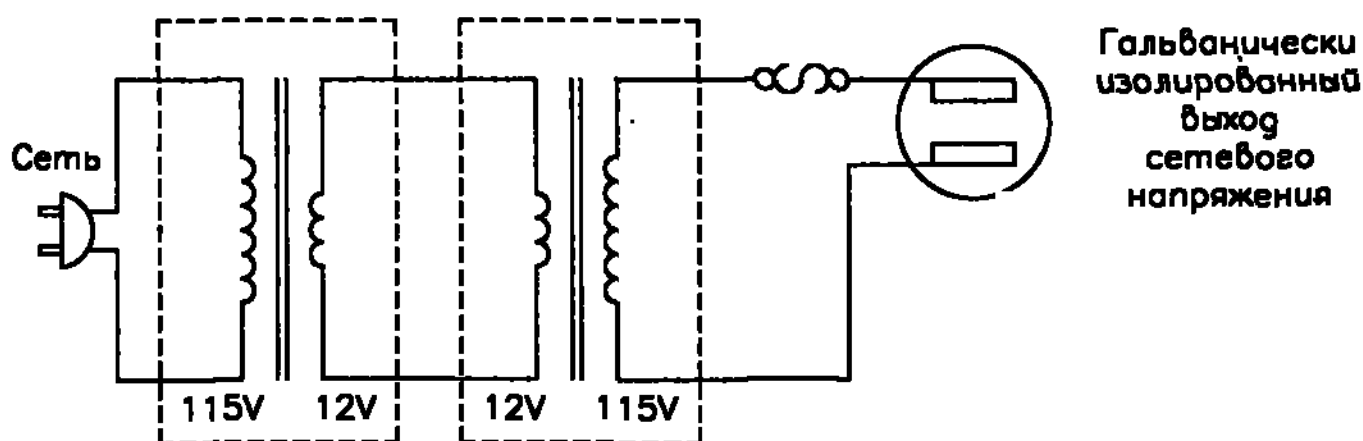


Рис. 2.8. Способ гальванической развязки от сети

Схема со встречным включением двух трансформаторов обеспечивает изоляцию от сети точно так же, как и стандартный изолирующий трансформатор.

10. Регулируемый автотрансформатор, часто называемый Variac¹ (ЛАТР). Этот прибор позволяет изменять напряжение сети и наблюдать за тем, как это сказывается на схеме.

Предупреждение: обычный регулируемый автотрансформатор не является изолирующим трансформатором. Для того чтобы получить безопасное регулируемое переменное напряжение, необходимо дополнительно использовать блок, содержащий два обычных трансформатора (см. рис. 2.8).

11. Характериограф. Этот прибор позволяет выявить ситуацию, когда при определенных условиях два транзистора, несмотря на значительные отличия характеристик, имеют одинаковое значение напряжения насыщения. Если один из приборов функционирует в штатном режиме, а второй работает плохо, то характериограф поможет выяснить причину. Характериограф также можно использовать для выявления нелинейных участков на различных характеристиках диодов, конденсаторов, ламп накаливания и резисторов. Характериограф позволяет исследовать батарею, причем как в режиме разряда на нагрузку, так и в режиме заряда. С его помощью можно проверять полупроводниковые приборы на пробой. А если вы приобретете дополнительные адаптеры или соберете нечто подобное самостоятельно, то сможете исследовать изменения коэффициента передачи, ослабления синфазного сигнала и коэффициента влияния (нестабильности) источников питания КВИП или КНИП операционных усилителей.
12. Запасные элементы исследуемой схемы. Следует держать эти запчасти в полной готовности, чтобы иметь возможность менять местами детали для проверки их исправности.
13. Полный ряд или касса резисторов и конденсаторов. Необходимо иметь запас резисторов номиналом от 0,1 Ом до 100 МОм и конденсаторов от 10 пФ до 1 мкФ. Пригодятся также конденсаторы емкостью 10, 100 и 1000 мкФ. Если в вашей схеме нет резисторов номиналом 0,1 Ом или 100 МОм, то это не означает, что они не понадобятся при поиске неисправностей. То же относится и к конденсаторам: если схема вдруг перестанет сбоить после установки конденсатора емкостью 3800 мкФ параллельно разъемам питания, то вы увидите, как нестабильность напряжений питания влияет на работу схемы. Также отметим, что может пригодиться несколько метров одножильного изолированного провода (например, телефонного кабеля). Отрезок витой пары из такого провода длиной несколько сантиметров представляет собой отличный подстроечный конденсатор, иногда называемый «джиммиком». «Джиммики» дешевы, и их емкость, в среднем составляющую 0,4 пФ на сантиметр длины, легко изменять, свивая или развивая провода.
14. Принципиальные схемы устройств. Крайне важно иметь в распоряжении несколько копий принципиальной схемы исследуемого изделия. На одной копии укажите значения напряжения, тока и формы сигналов при нормальной

¹ Зарегистрированная торговая марка компании GENRAD Corp., Concord, MA. Variac можно приобрести в фирме JLM Electronics (56 Somerset St., P.O. Box 10317, West Hartford, CT 06110, (203) 233-0600).

работе схемы и используйте ее в качестве справочника. На остальных можно делать пометки и изображать формы сигналов, относящиеся к конкретной исследуемой схеме. Вам также понадобятся схемы всего самодельного оборудования, которое вы планируете использовать. Иногда результаты измерений, проведенных с помощью самодельного оборудования, не согласуются с результатами, полученными на оборудовании промышленного изготовления. Соответствующими действительности могут оказаться результаты, полученные с помощью как одного, так и другого прибора. Различия в результатах могут быть вызваны особенностями конструкции, например особенностями фильтрации сигнала. Если у вас есть схемы всего оборудования, то проще разобраться в причинах такого несоответствия. И наконец, могут понадобиться справочные данные и принципиальные схемы всех используемых интегральных микросхем.

15. Нужно постараться получить доступ к научному или промышленному тестовому оборудованию. Оно очень эффективно для проверки того, что при ремонте одного участка схемы вы не оказали неблагоприятного воздействия на другую ее часть. Остальное оборудование и приборы также попадают под определение специализированного тестового оборудования, и потребность в его применении зависит от типа исследуемой схемы. Ниже приведены три примера: пробник «коротышей», транзисторный АМ приемник и гетеродинный индикатор резонанса (ГИР), или волномер.

Пробник «коротышей» полезен в том случае, когда нужно отремонтировать большое количество печатных плат: с его помощью легко найти место короткого замыкания между дорожками земли и дорожками питания или сигналов. Конечно, такую работу можно выполнить с помощью чувствительного цифрового вольтметра, но использовать пробник «коротышей» гораздо удобнее и эффективнее. Кроме того, если пробник не подключен, то он самостоятельно выключается и не будет потреблять электроэнергию. На схеме пробника «коротышей» (рис. 2.9) операционный усилитель LM10 усиливает падение напряжения и подает его на вход преобразователя напряжение-частота LM331, который вы настраиваете так, чтобы он выдавал сигнал максимальной частоты при напряжении $V_{in} = 0$. При использовании данного пробника необходим источник питания с ограничением тока на уровне порядка 50–100 мА. Для того чтобы откалибровать пробник, сначала заземлите оба его щупа и с помощью потенциометра установки нуля подберите максимальную высоту тона. Затем переместите положительный щуп на дорожку с напряжением V_s в блоке А и с помощью потенциометра подстройки усиления установите минимальную высоту звука. На рис. 2.9 одна из пяти основных дорожек шины питания на дефектной плате замкнута на землю перемычкой из припоя.

Для того чтобы найти точное местоположение короткого замыкания, следует просто передвигать положительный щуп вдоль дорожек. В нашем примере, если передвинуть его с дорожки А в направлении В или D, то высота сигнала не изменится, так как напряжение в этих точках одинаково и ток по этим дорожкам не течет. Но если повести пробник по направлению А–С или

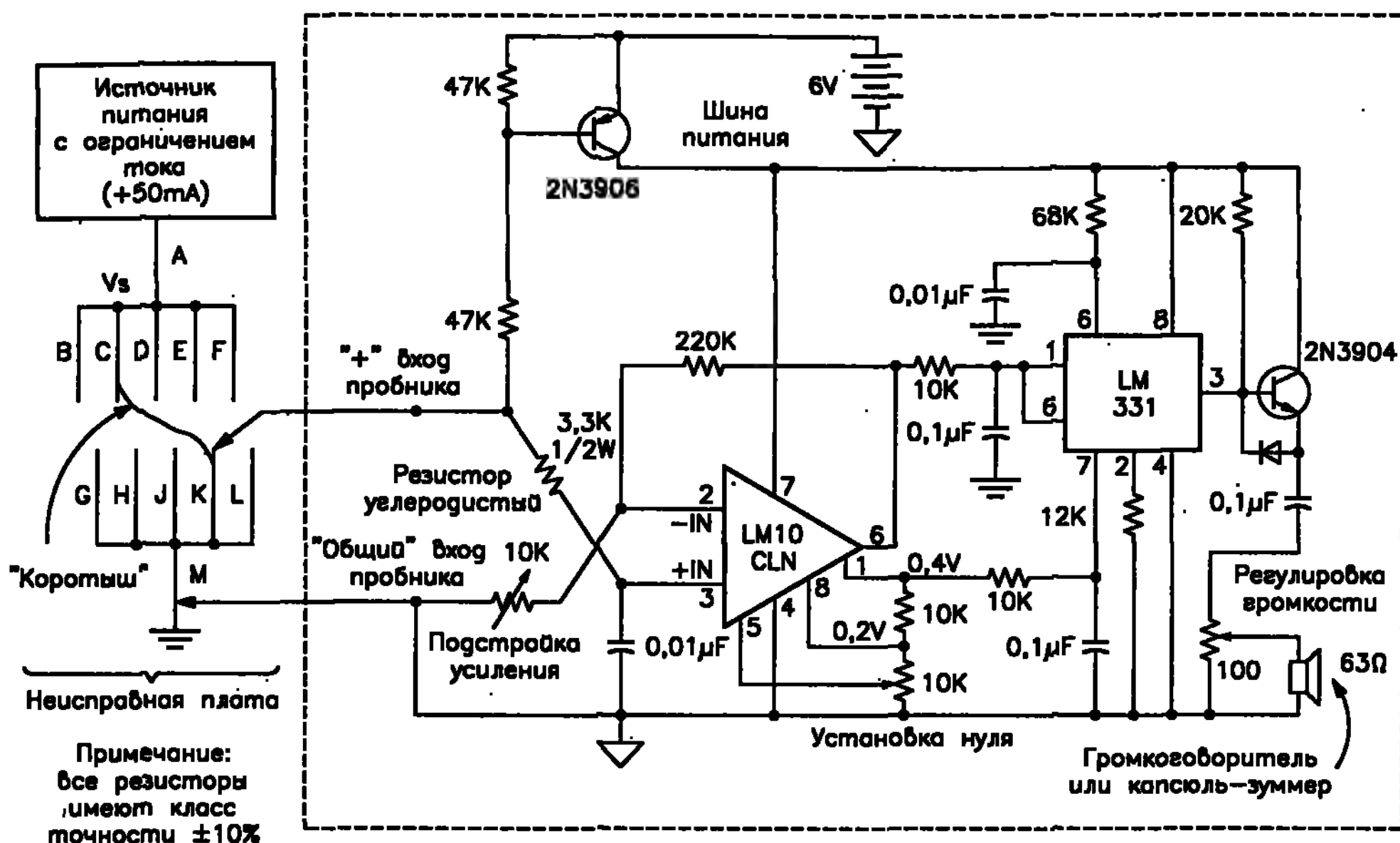


Рис. 2.9. Пробник коротких замыканий для поиска «коротышей» на печатных платах

Примечание к рис. «Коротыш» - короткое замыкание между проводниками на плате.

К–М, то высота сигнала начнет меняться, так как в этом случае, по мере движения пробника, будет меняться падение напряжения на сопротивлении проводников. Это достаточно простая и наглядная технология. Научиться распознавать изменения тона сигнала несложно.

АМ радиоприемник. Что делать, если неисправность «сидит на неисправности и неисправностью погоняет»? Обычно действуют приблизительно так: сначала улучшают аналоговую схему, а потом при очередном ее включении на выходе обнаруживаются колебания очень большой амплитуды. Проверка всего, что связано с этой схемой, ничего не дает – колебания никуда не исчезают. Они присутствуют практически везде: в выходной цепи, во входном каскаде, во многих внутренних точках схемы и даже на шине земли. После выключения цифрового вольтметра, генератора функций, паяльника и даже источников питания колебания не исчезают.

Наконец вы оглядываете лабораторию в поисках того, кто включил генератор или импульсный стабилизатор, которые могут служить и передатчиками средней мощности. Что еще можно сделать, помимо того, чтобы громко вопрошать: «У кого там новая схема, лучшая на 87 кГц?» Одним из полезных инструментов в этом случае может быть обычный АМ радиоприемник. Как известно, FM радиоприемники отфильтровывают шумы, а вот АМ радиоприемники собирают их, причем на таких частотах и с такими спектральными характеристиками, что вы наверняка удивитесь.

Как же может маленький приемник с полосой пропускания низких частот не шире 5 кГц выявить шумы в килогерцовом и мегагерцовом диапазонах?

Ответ, очевидно, заключается в том, что для большинства импульсных шумов частоты повторения лежат выше звукового диапазона, но ниже частот АМ диапазона, и в их спектрах присутствуют гармоники, частоты которых попадают в окрестности 600 кГц. В этой области приемники АМ диапазона обладают отличной чувствительностью, которой достаточно для приема сигналов с напряженностью поля, равной всего нескольким микровольтам на метр.

Если вы скептически относитесь к способности АМ приемника выявлять такие сигналы, то настройте его на волну в нижней части шкалы где-нибудь между станциями. Затем поднесите к ближайшему цифровому вольтметру, компьютеру или компьютерной клавиатуре и послушайте, какой будет шум. Также учтите, что ферритовая стержневая антенна обладает направленностью, поэтому можно приблизительно определить, где находится источник шума. Можно либо воспользоваться нуль-режимом (по минимуму сигнала), либо поворачивать антенну так, чтобы получить максимальный сигнал. Простейший радиоприемник диапазона АМ полезен в тех случаях, когда возникает необходимость рыскать по лаборатории и дружелюбно улыбаться своим коллегам в поисках супостата.

Гетеродинный индикатор резонанса (ГИР-волномер). В некоторых случаях частота и темп повторения шума настолько высоки, что АМ приемник не может ничем помочь в поиске неисправностей. Чем же тогда пользоваться? Очень давно радиоинженеры обратили внимание, что если включить ламповый генератор и поместить его в область мощных колебаний сопоставимой частоты, то ток на сетках ламп начнет изменяться, как только частоты колебаний совпадут. Приспособление, использующее этот эффект, получило известность как гетеродинный индикатор резонанса. Не могу сказать, что считаю себя экспертом по использованию этого прибора, однако вспоминаю свое впечатление от него, когда только появились полупроводниковые микросхемы. Одна аналоговая схема самовозбуждалась на частоте 98 МГц, и ГИР-волномер помог выявить причину неисправности: когда я покрутил туда-сюда ручку установки частоты, стало понятно, что погрешность уровня выходного сигнала вызвана детектированием ВЧ колебаний.

Это было 25 лет назад, и, безусловно, компания Heathkit¹ прекратила выпуск старых волномеров Grid Dip и Tunnel Dip, заменив их более современными устройствами. В новой модели волномера, названной просто HD-1250 "Dip Meter", используются биполярные и полевые двухзатворные МОП транзисторы. Так как этот прибор стоит недорого, его необходимо иметь в каждой лаборатории. Такие устройства помогут разобраться с источниками раздражающих «звонов» частотой вплоть до 250 МГц. В руководстве по применению, входящем в комплект набора деталей волномера HD-1250, также можно найти несколько советов по поиску неисправностей.

¹ Heath Company, Benton Harbor, Michigan, 49022; 1-800-253-0507 – компания специализируется на торговле конструкторами и наборами деталей. Описываемая модель ГИР-волномера также продается в виде конструктора для самостоятельной сборки. – Прим. ред.

Когда гетеродинные индикаторы резонанса только-только приобрели известность, самый широкополосный из бывших тогда в продаже осциллографов имел полосу пропускания всего лишь в несколько десятков мегагерц. В наше время можно купить осциллограф с шириной полосы в несколько сотен мегагерц, поэтому ситуации, когда требуется ГИР-волномер, встречаются нечасто. Тем не менее вы можете использовать его в режиме генератора для возбуждения пассивных избирательных цепей и определения их частот и резонансов. Кроме того, в небольших фирмах, где никто не позволит потратить кучу денег на скоростной осциллограф, незаменимой альтернативой такого прибора будут гетеродинные индикаторы резонанса.

16. Несколько исправных схем. Часто можно определить неисправность, просто сравнивая дефектные блоки с исправными. Также можно использовать исправные схемы для того, чтобы убедиться, что ваше нестандартизованное оборудование работает правильно.
17. Прочный широкий рабочий стол. На нем должна быть металлическая пластина, которую можно легко заземлить непосредственно на «заземляющий контур». Такой заземленный лист необходим, чтобы предотвратить неблагоприятное воздействие на схему ВЧ помех, наводок частотой 50 или 60 Гц, а также шумов всех других видов. Между поверхностью стола и проверяемой схемой следует прокладывать лист изолирующего материала, чтобы не вызвать закорачивания на землю.

Есть еще один способ избавиться от интерференции внешних шумов с отлаживаемой схемой – использовать большой кусок одностороннего фольгированного текстолита. Если такую пластину положить вниз фольгой, припаяв к ней шину заземления, то получится отличная замена металлической пластине.

Для того чтобы предотвратить повреждение КМОП схем электростатическим разрядом, следует заземлять ваши запястья через резисторы сопротивлением 1 МОм.

18. Средства индивидуальной защиты. При работе со схемами средней и большой мощности, в которых при возникновении неисправностей может произойти сильный взрыв, вам необходимо надевать защитные очки или обычные очки с безопасными линзами. Также стоит держать под рукой огнетушитель.
19. Достаточно мощный паяльник. Если вам приходится выпаивать или запаивать силовые шины на широких дорожках печатных плат, то необходимо использовать достаточно мощный паяльник, обычный или быстрого нагрева. Для работы с небольшими и тонкими дорожками около интегральных схем совершенно необходим паяльник с тонким жалом. Кроме того, нужно убедиться, что паяльник достаточно хорошо прогрет. Очень просто вызвать отслоение фольги на дорожке или контактной площадке, подвергнув ее слишком долгому непрерывному нагреву, что может случиться, если ваш паяльник недостаточно мощный или недостаточно прогрет.

Совет не использовать в работе очень горячий паяльник, который выпускала компания Heathkit, устарел, как и германиевые транзисторы. Иногда может

потребоваться паяльник с заземленным жалом, а иногда идеальным инструментом будет автономный паяльник (незаземленный или работающий от аккумуляторов). Всегда проверяйте, заземлен ваш паяльник или нет.

20. Приспособления для удаления припоя, например оплетка для сбора припоя или отсос для припоя. Вы должны хорошо владеть всеми используемыми в работе инструментами – оптимально отлаженная техника является основным условием успеха в работе. Если вы работаете с деталями, чувствительными к статическому электричеству, то лучше применять антистатический отсос для припоя, который защищен от накопления статического заряда. Меня предупредили, что могут возникнуть проблемы с отсосом большого диаметра при работе с узкими дорожками на печатных платах. В такой ситуации для удаления припоя лучше пользоваться оплетками.
21. Ручной инструмент. Среди прочего вам понадобятся острые бокорезы, плоскогубцы разных размеров, отвертки, большие кусачки, гаечные ключи, устройство для зачистки проводов и складной нож или нож Exacto™.
22. Соединительные проводники, разъемы, кабели, различные коаксиальные переходники, провода, провода с наконечниками, щупы с подпружиненными крючками, зажимы-«крокодилы» – все это может понадобиться. Скардность и экономия на этих мелочах наверняка потребуют больших временных затрат: плохо подключенные провода имеют тенденцию отваливаться или замыкать что-либо.
23. Медицинская «заморозка» и фен для волос. «Заморозка» продается в аэрозольной упаковке, с ее помощью можно быстро остудить отдельные детали. А феном можно подогреть всю схему. Вы должны знать, какую температуру имеет выходящий из фена воздух, так как это именно та температура, до которой будет прогрето устройство.

Замечание: в соответствии с требованиями экологов мы не должны использовать охлаждающие аэрозоли, в которых используются хлорфтороуглеродистые соединения (фреоны). У меня есть несколько баллонов, которые, по мнению защитников природы, использовать нельзя. И что же с ними делать? Выбросить на свалку? Но и в этом случае их содержимое все равно попадет в атмосферу, не принеся никакой пользы. Я решил использовать все имеющиеся у меня вредные аэрозоли до конца, но когда придет время покупать новые, то я обязательно куплю экологически безопасные.

24. Увеличительное стекло или ручная лупа. Эти приспособления понадобятся при проверке плат, проводов и деталей на наличие повреждений, трещин, замыканий между дорожками в виде тонких остатков припоя (волосинок), плохо пропаянных соединений.
25. Настольная лампа и фонарь. Вы должны четко видеть то, что делаете; более того, при хорошем освещении проще проверять платы и детали.
26. Термометр с термопарой. Если термометр работает от аккумулятора или батареек, то можно приложить термопару к любой точке схемы и точно измерить температуру, не оказывая практически никакого электрического или термического воздействия на элементы. На рис. 2.10 изображена схема усилителя сигнала термопар со встроенной компенсацией напряжения холодного спая. Многие считают, что интегральная микросхема полупроводникового

термодатчика LM35 (рис. 2.11) – простейшее средство для измерения температуры, и они правы. Но если приложить или припаять микросхему LM35, выпускаемую в корпусе ТО-46, к резистору или к элементу в корпусе ТО-5 или ТО-3, то LM35 увеличит их теплоемкость и выводы этой микросхемы начнут отводить дополнительное тепло от устройства, температуру которого вы собираетесь измерить. Следовательно, полученные вами результаты будут менее точными, чем при использовании маленькой термопары с тонкими выводами.

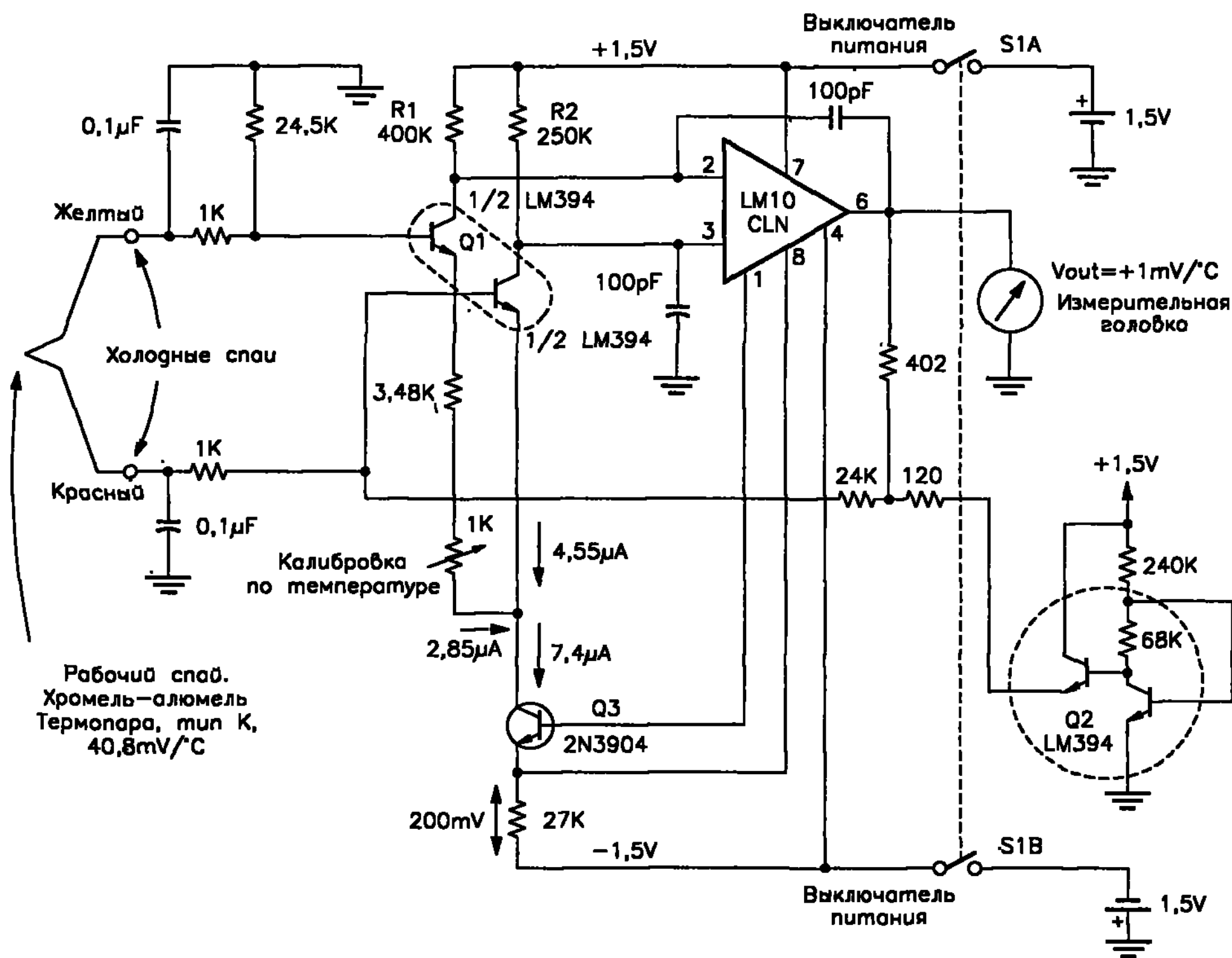


Рис. 2.10. Термометр на термопаре

В этом усилителе сигналов термопары компенсация напряжения холодного спая производится обоими транзисторами интегральной сборки Q1, рабочие токи которых выбраны в соотношении 1,6:1. Напряжения V_{BE} транзисторов различаются на $12 \text{ мВ} + 40,8 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$. Эта разность в точности компенсирует напряжение холодного спая, также имеющее температурный коэффициент $40,8 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$. Для получения наивысшей точности в качестве R1 следует использовать четыре последовательно соединенных резистора по 100 кОм , а в качестве R2 – цепь из двух последовательно соединенных резисторов по 100 кОм и двух таких же резисторов, соединенных параллельно. Все резисторы должны быть одного типа, одного и того же производителя и из одной партии. Транзистор Q2 и соответствующие элементы обеспечивают дополнительную коррекцию при очень низких температурах и не нужны, если термопара работает только при температурах выше 0°С . Поблагодарим Минео Яматаке за разработку этой элегантной схемы.

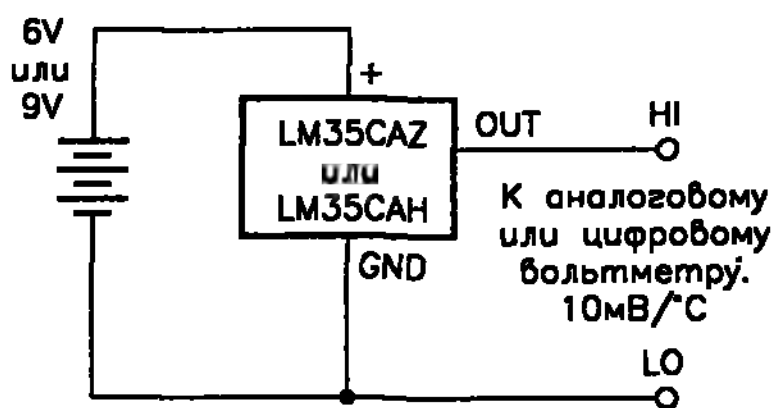


Рис. 2.11. Точный датчик температуры

LM35CAZ – надежный, простой и удобный универсальный датчик температуры. Однако не стоит использовать его для измерения температуры малогабаритных объектов или же в случае значительных температурных градиентов. В таких случаях вы получите менее точный результат, чем при использовании маленькой термопары с тонкими выводами.

27. Малогабаритные фильтры в аккуратных металлических корпусах, которые помогут получить хорошее отношение сигнал/шум при подаче сигнала на осциллограф. Эти фильтры должны иметь переключатели для выбора частоты среза и надежные разъемы. Если потребуются фильтры с крутым спадом, вы сами можете сделать такой фильтр, используя для этого операционные усилители и батареи. Вам решать, что вам нужно. Мне обычно достаточно нескольких пассивных RC-фильтров и «крокодилов».
28. Переходники для сетевых вилок – это «три на два» для сетевых кабелей с 3-штыревыми вилками. Потребуется несколько таких переходников. Они нужны прежде всего потому, что у очень большого количества осциллографов и генераторов клемма «земля» соединена с проводом нейтрали в сетевом кабеле. Используя эти переходники, можно исключить образование «земляных петель». Стоит предусмотреть и несколько про запас, так как приятели имеют тенденцию постоянно таскать именно ваши. С этой целью обязательно позаботьтесь о соответствующем количестве розеток и тройников.
Когда несколько лет назад проводилась замена электропроводки на наших рабочих столах, электрики хотели установить на каждом столе по пять розеток. Я настоял на установке 10 розеток, обычно и этого хватает только-только.

Вот и все об оборудовании, необходимом для обычной работы по поиску неисправностей в аналоговых схемах. В зависимости от того, с какими схемами приходится сталкиваться, наверное, понадобятся и другие полезные приборы. Анализаторы логических состояний, измерители полных сопротивлений, программируемые источники тока, измерители емкости, генераторы импульсов – все эти устройства могут облегчить решение разнообразных задач, возникающих при поиске неисправностей.

У каждого, надо полагать, есть свои соображения о том, что в конкретном случае является главным, а что второстепенным, и я бы с удовольствием прочитал ваши отзывы на эту тему. Вы можете написать мне по адресу, указанному в разделе «Благодарности».

Литература

1. Collins, Jack, and David White, "Time-domain analysis of aliasing helps to alleviate DSO errors", *EDN*, September 15, 1988, с. 207.

3. РЕЗИСТОРЫ И ДРОССЕЛИ

В первых главах мы говорили о философии поиска неисправностей в аналоговых схемах и определили, какие приборы и инструменты нам для этого понадобятся. Но если, работая со схемой, вы не заинтересуетесь тем, что же могло вызвать отказ, то найти причину неисправности будет непросто. Итак, в этой главе рассмотрены резисторы, предохранители, дроссели и трансформаторы; особенности отказов этих компонентов; а также те неожиданные проблемы, которые могут возникнуть, если вы используете детали неподходящего типа. (Конденсаторы пока подождут, о них мы поговорим в следующей главе. Хотя как-то даже неловко «сегрегировать» их от резисторов...)

Поиск неисправностей в схеме часто сводится к обнаружению отказавшего пассивного элемента. Причиной отказа может стать как неправильный выбор детали на этапе проектирования, так и различные повреждения или дефекты какого-то компонента, что и препятствует нормальной работе схемы. Источником неприятностей могут оказаться и резисторы, и катушки индуктивности, и трансформаторы.

Резисторы, очевидно, являются самыми простыми пассивными радиоэлементами, и, если исключить все экстремальные и запутанные ситуации, вряд ли часто встречаются проблемы, вызванные собственно резисторами. Я не имею в виду, что никогда не было проблем с резисторами, но бóльшая часть из них вызвана тем, как они используются – правильно или нет, а также ошибками в выборе их типа. В отдельных случаях какой-нибудь другой компонент схемы может привести к выходу резистора из строя, и отказ резистора – это просто симптом более серьезной проблемы.

Возможно, для того чтобы получить работоспособную схему, придется разобраться с многочисленными проблемами, связанными с резисторами. Некоторые из них будут очевидными. Например, в вашей схеме нужно использовать резистор номиналом 10 кОм. Техник, порывшись в соответствующей ячейке кассы, вместо нужного случайно достанет резистор сопротивлением 1 кОм, который впоследствии и установит на плату. Это пример наиболее распространенной причины связанных с резисторами неприятностей в нашей лаборатории. Поэтому я требую

от техников монтировать резисторы на плате так, чтобы их номиналы было легко проверить. И каждый раз, когда мне попадается номинал 1 кОм вместо нужного 10 кОм, я проверяю, сколько еще резисторов номиналом 1 кОм находится в ячейке для резисторов номиналом 10 кОм. Очень часто их там бывает предостаточно!

Иногда на резистор неправильно нанесена маркировка, иногда его сопротивление изменяется в результате старения, перегрева или резких перепадов температуры. Не так давно нам попалась партия металлооксидных резисторов класса точности 1%, сопротивление которых возросло на 20–900% от номинала всего лишь после нескольких дюжин термоциклов от -55 до $+125$ °C. Оказалось, что наш отдел контроля качества разрешил применять в платах для работы на «предельных режимах» только несколько конкретных типов резисторов, и те, которые использовали мы, к ним не относились. Так что сотрудники отдела входного контроля тоже выявили причину этого отказа.

3.1. Характеристики резисторов

Чтобы наилучшим образом выбирать резисторы для разработки электронных устройств, следует хорошо изучить их типы. В табл. 3.1 приведены наиболее важные характеристики самых распространенных резисторов. Элементы одного типа могут отлично работать в одном устройстве, а в другом окажутся причиной катастрофического отказа. Например, я часто вижу, как какой-нибудь инженер планирует применить композиционный углеродистый резистор в том случае, когда требуется стабильность и малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Иногда это оказывается откровенно неудачным решением, и замена композиционного резистора на стабильный металлопленочный (к примеру, на RN55D или RN60C) с ТКС, составляющим 50 или максимум $100 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, значительно увеличит точность и стабильность. В другом случае инженер говорит: «Я пробовал ставить там металлопленочный резистор, но, когда поставил углеродистый, общий температурный коэффициент схемы улучшился». Это означает, что он полагается на неизменный ТКС композиционного углеродистого резистора и что таким образом можно компенсировать другие проблемы общей температурной нестабильности. Я советую не рассчитывать на неизменность ТКС композиционных углеродистых резисторов и не рекомендую использовать их в тех устройствах, где требуется точность и стабильность, даже если вы видите определенные реальные улучшения в общем температурном коэффициенте схемы.

Однако у композиционных углеродистых резисторов есть своя область применения. Недавно я рецензировал военные технические требования, в которых описывалось оборудование, необходимое для проверки устойчивости схем к электростатическим разрядам. В качестве токоограничивающего сопротивления в цепи разряда высоковольтного конденсатора требовалось использовать точный резистор номиналом 1500 Ом. В этом случае можно было бы предположить, что нужен металлопленочный резистор. Резисторы этого типа изготавливают путем нарезки спиральных канавок в пленке, нанесенной на керамическое основание резистора (рис. 3.1а). При работе с высокими напряжениями в промежутках между витками спирали могут возникать пробой, которые приводят к тому, что через

резистор течет гораздо больший ток, чем следует из закона Ома, и резистор начнет саморазрушаться. Следовательно, технические требования однозначно требуют применения объемно-композиционного резистора, рабочий элемент которого представляет собой большой «кусок» резистивного материала. Резисторы этого типа могут выдерживать большие кратковременные перегрузки без повреждений. Если металлопленочный резистор подвергнется 2- или 4-кратной перегрузке даже на очень короткое время, то неравномерный нагрев спиральной части может привести к тому, что резистор «попортится». Подобную проблему можно решить, используя несколько соединенных последовательно металлопленочных резисторов. Если соединить последовательно 15 100-омных резисторов мощностью 0,125 Вт, то каждый в отдельности не будет подвергаться перегрузке по высокому напряжению или по рассеиваемой мощности.

Пленочные углеродистые резисторы в настоящее время стоят недорого и широко используются в разных лабораториях. Основное неудобство при работе с ними в том, что они выглядят как металлопленочные и большинство их характеристик похоже. Пленочные углеродистые резисторы, так же как и металлопленочные, имеют класс точности 1%, изготавливаются обычно путем нарезки спиральных канавок и подвержены тем же ограничениям на перегрузки по напряжению. Тем не менее у углеродистых резисторов гораздо более высокий ТКС – от 500 до 800 млн⁻¹/°С. Ошибиться очень легко – применить нестабильный углеродистый резистор там, где требуется металлопленочный. Не надо их путать.

Прецизионные металлопленочные резисторы, с другой стороны, имеют более высокую точность и хороший ТКС. По сравнению с обычными резисторами типов RN55D и RN55C с ТКС порядка 100 или 50 млн⁻¹/°С, прецизионные резисторы гораздо лучше и имеют ТКС, равный 20, 10, 5 или 2 млн⁻¹/°С, и точность до 0,01%.

Эти резисторы сравнимы с малогабаритными прецизионными проволочными резисторами, но они обычно еще меньше и несколько дешевле. Кроме того, по

Таблица 3.1. Характеристики основных типов резисторов

Тип резистора	Диапазон номиналов*	ТКС	Паразитные параметры	Стоимость
Композиционные различные	1 Ом – 22 МОм	Большой	Малые	Низкая
Металлопленочные	10 Ом – 1 МОм	Малый	Средневыраженные	Средняя
Углеродистые пленочные	10 Ом – 10 МОм	Средний	Средневыраженные	Средняя
Проволочные прецизионные	1 Ом – 1 МОм	Малый	Заметные	Высокая
Проволочные большой мощности	0,01 Ом – 100 кОм	Средний	Заметные	Средняя
Тонкопленочные	25 Ом – 100 кОм	Малый	Малые	Средняя
Толстопленочные	10 Ом – 1 МОм	Малый	Малые	Средняя
Диффузионные	20 Ом – 50 кОм	Большой	Заметные	Низкая

* Диапазоны номиналов могут различаться у разных производителей.

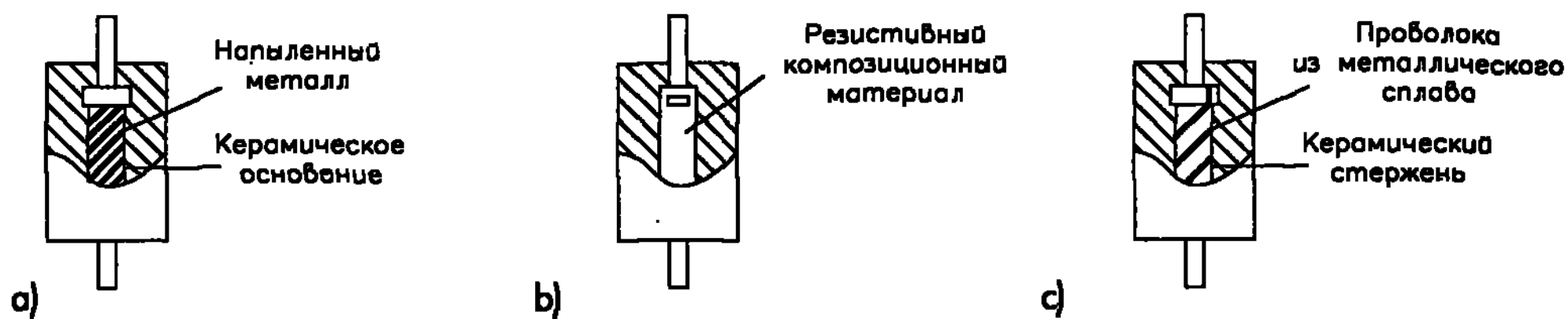


Рис. 3.1. Типы резисторов

Пленочные резисторы (а) изготавливаются путем нарезки спиральной канавки в металлической или углеродистой пленке, нанесенной на непроводящий сердечник. В объемных композиционных резисторах (б) используется сплошной сердечник из резистивного материала; проволочные резисторы (в) изготавливаются путем намотки проволоки с высоким удельным сопротивлением на сердечник из изолятора.

сравнению с проволочными резисторами, они обладают гораздо меньшей паразитной индуктивностью и, следовательно, могут применяться для работы в быстродействующих схемах. У нескольких витков спирали из пленки индуктивность очень мала по сравнению с индуктивностью сотен или тысяч витков проволоки в обмотке проволочного резистора. Прецизионные пленочные резисторы также производятся в виде комплектов специально подобранных резисторов, у которых относительная точность выше и разбаланс ТКС меньше, чем у отдельных резисторов.

Если требования очень жесткие, а бюджет разработки достаточно велик, то можно использовать заказные тонкопленочные резисторные сборки, выполненные на одной подложке. Более экономичный путь – использовать прецизионные согласованные тонкопленочные сборки из четырех, семи или восьми резисторов, размещенных в корпусе типа DIP. Я обнаружил, что у элементов некоторых фирм-производителей радиокомпонентов разброс ТКС менее $1 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}^1$.

Эти элементы идеально подходят для схем прецизионных усилителей и цифро-аналоговых преобразователей. Чтобы получить представление о том, где могут понадобиться подобные элементы, взгляните на согласованные резисторы в усилителе сигналов термопар (см. рис. 2.10). И еще один совет: когда вы получаете пленочные резисторы, не вынимайте их из упаковочной ленты. Предположим, вам понадобятся наборы согласованных резисторов, тогда, если вы будете брать расположенные на ленте рядом, можете быть уверены, что их номиналы и ТКС окажутся очень близкими.

Толстопленочные резисторы обычно используются не только в гибридных активных микросхемах, но и в виде сборок или наборов. Они изготавливаются из кермета или других соответствующих материалов. После того как через трафарет на керамическую подложку наносится пастообразный материал, заготовка спекается и обжигается. У таких резисторов ТКС не так хорош, как у тонкопленочных, однако они популярны, потому что имеют очень малый разброс ТКС, недороги и их легко подгонять до точности 1 или 0,5%.

¹ Например, сборки F08B103A фирмы Allen Bradley, 694-3-R-10K-A фирмы Beckman и T-914-10k-100-05 фирмы Caddock. Все эти компоненты содержат по четыре резистора сопротивлением 10 кОм, согласованных с точностью 0,05%, имеют средний ТКС порядка $50 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ и разброс ТКС не более $5 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Выпускаются в 8-выводном корпусе мини-DIP.

Самыми качественными и наиболее стабильными резисторами традиционно считались проволочные (рис. 3.1с). В настоящее время прецизионные металлопленочные резисторы вполне могут сравниться с проволочными практически по всем характеристикам. Однако последние номиналом от 200 кОм до 1 МОм дороже и размеры их заметно больше. У проволочных резисторов есть еще один недостаток: паразитная индуктивность такого резистора делает практически невозможным достижение очень малых времен установления (менее 1 мкс). Но при использовании намотки специального типа (бифилярная) паразитную индуктивность резистора можно значительно снизить. Эти типы намотки в каталогах многих изготовителей приведены под названием “Type HS” (тип HS). Однако я выяснил, что существует два различных типа, называемых HS: у одного индуктивность почти нулевая, но значительно увеличенная межвитковая емкость, а у второго индуктивность небольшая, но одновременно и емкость небольшая. Вторым тип намотки отлично подходит для применения в усилителях с малым временем установления.

Относитесь к чрезмерно упрощенным в научном смысле заявлениям производителей с большой осторожностью.

Несколько лет назад в ходе сборки прецизионного усилителя использовались проволочные резисторы и у нас возникла непростая проблема. Сигнал на выходе постоянно «плавал от берега до берега и обратно», хотя усилитель, стабилитроны и транзисторы работали стабильно. Что же порождало дрейф? Оказалось, что «плавал» проволочный резистор, так как мы ошибочно поставили специальный термокомпенсационный резистор, ТКС которого был равен $3300 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Такие резисторы часто используются для коррекции температурного коэффициента транзисторных логарифмирующих схем, но на этом резисторе не было четкой маркировки. После того как мы установили в схему термокомпенсационный резистор вместо обычного резистора с малым ТКС, нам пришлось потратить два часа, чтобы разобраться в проблеме.

3.2. Температурные коэффициенты

У диффузионных резисторов, часто используемых в интегральных схемах, есть несколько особенных характеристик. Их ТКС очень велик – около $+1600 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ – и содержит нелинейную, обычно квадратурную, составляющую. Следовательно, сопротивление при высоких температурах растет быстрее, чем падает при отрицательных. От этих резисторов было бы немного толку, если бы не одна тонкость: разброс ТКС у них составляет приблизительно $\pm 1 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. При этом в интегральной микросхеме очень просто изготовить пару или более согласованных резисторов – вот причина популярности этих устройств у разработчиков интегральных схем. Если вы не занимаетесь разработкой интегральных микросхем, то наверняка будете встречаться с диффузионными резисторами очень редко.

Во многих интегральных схемах, таких как цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и источники опорного напряжения, широко используются тонкопленочные резисторы (сихромовые или нихромовые), размещаемые непосредственно на кристалле. По сравнению со многими другими типами, у этих резисторов

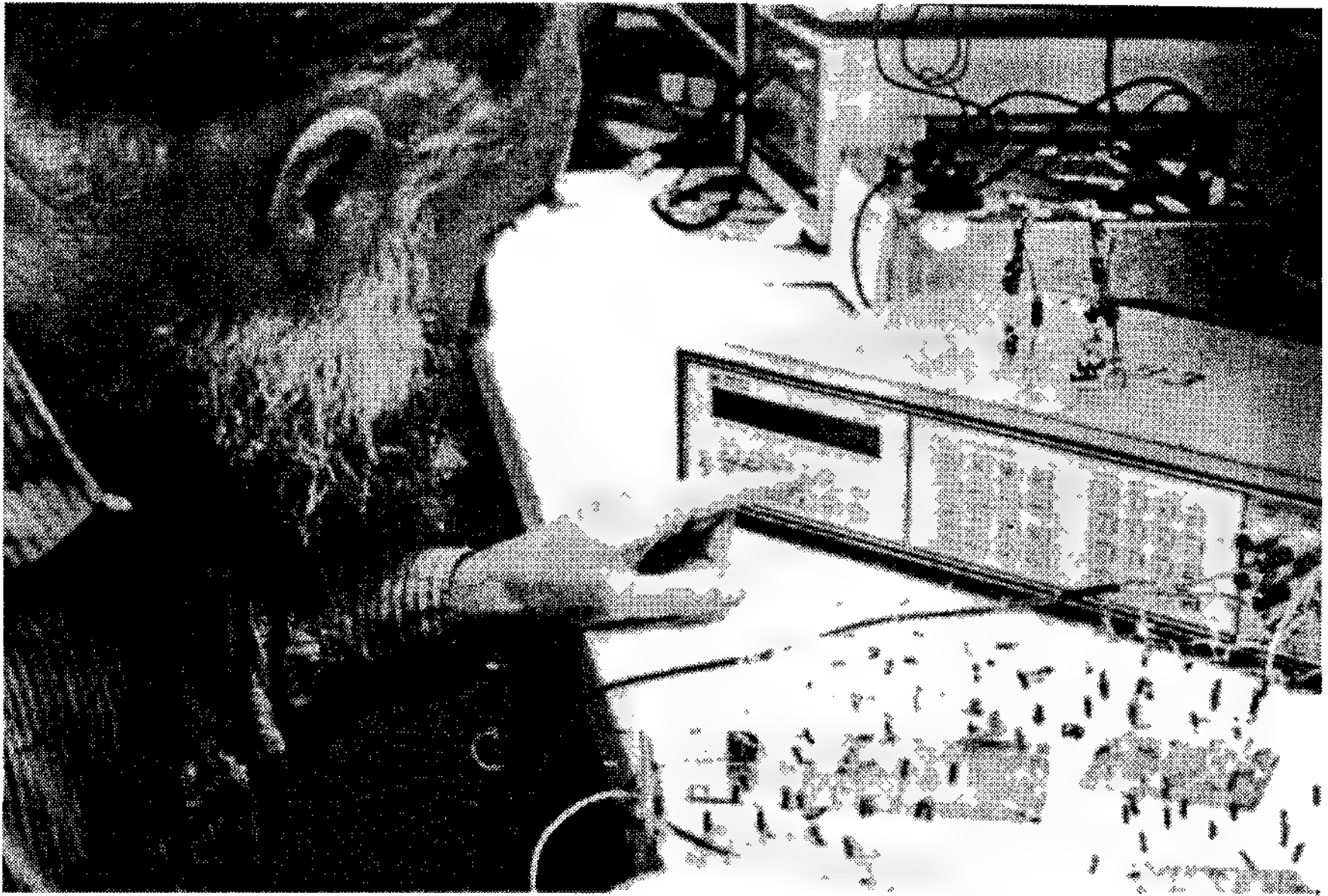


Рис. 3.2. С помощью тщательно подобранных прецизионных резисторов Боб моделирует сопротивления участков металлизации кристалла операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе

небольшое значение ТКС – от 50 до 350 $\text{млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, выше повторяемость параметров и долговременная стабильность, меньше разброс ТКС и нелинейность коэффициента напряжения.

Последний термин относится к нелинейностям относительно закона Ома, которые проявляются при подаче на резистор большого напряжения. Этот эффект часто наблюдается в резисторах с очень большим или очень маленьким сопротивлением – то есть в тех, которые имеют высокую концентрацию примесей.

Таким образом, когда на вход цифро-аналогового преобразователя подается опорное напряжение, вы вправе ожидать, что во всем рабочем диапазоне температур величина входного сопротивления R_{in} будет изменяться всего на 1–3%. Однако на самом деле разброс может оказаться намного больше, так как совсем непросто удерживать строгие допуски на этапе формирования удельного сопротивления при производстве интегральных схем. К примеру, у обычного ЦАП входное сопротивление R_{in} равно 15 кОм $\pm 33\%$. А у его пленочных резисторов разброс ТКС лучше, чем у диффузных, обычно порядка 1 $\text{млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$.

Помимо ТКС следует также учитывать паразитную емкость резистора. Не так давно я пытался сделать активный щуп с большим входным сопротивлением и малой входной емкостью (см. главу 2). Я хотел включить последовательно несколько резисторов по 2,5 МОм так, чтобы получить сопротивление 10 МОм. Измерил паразитную емкость нескольких разных резисторов с помощью нашего лабораторного измерительного моста. Один углеродистый композиционный резистор

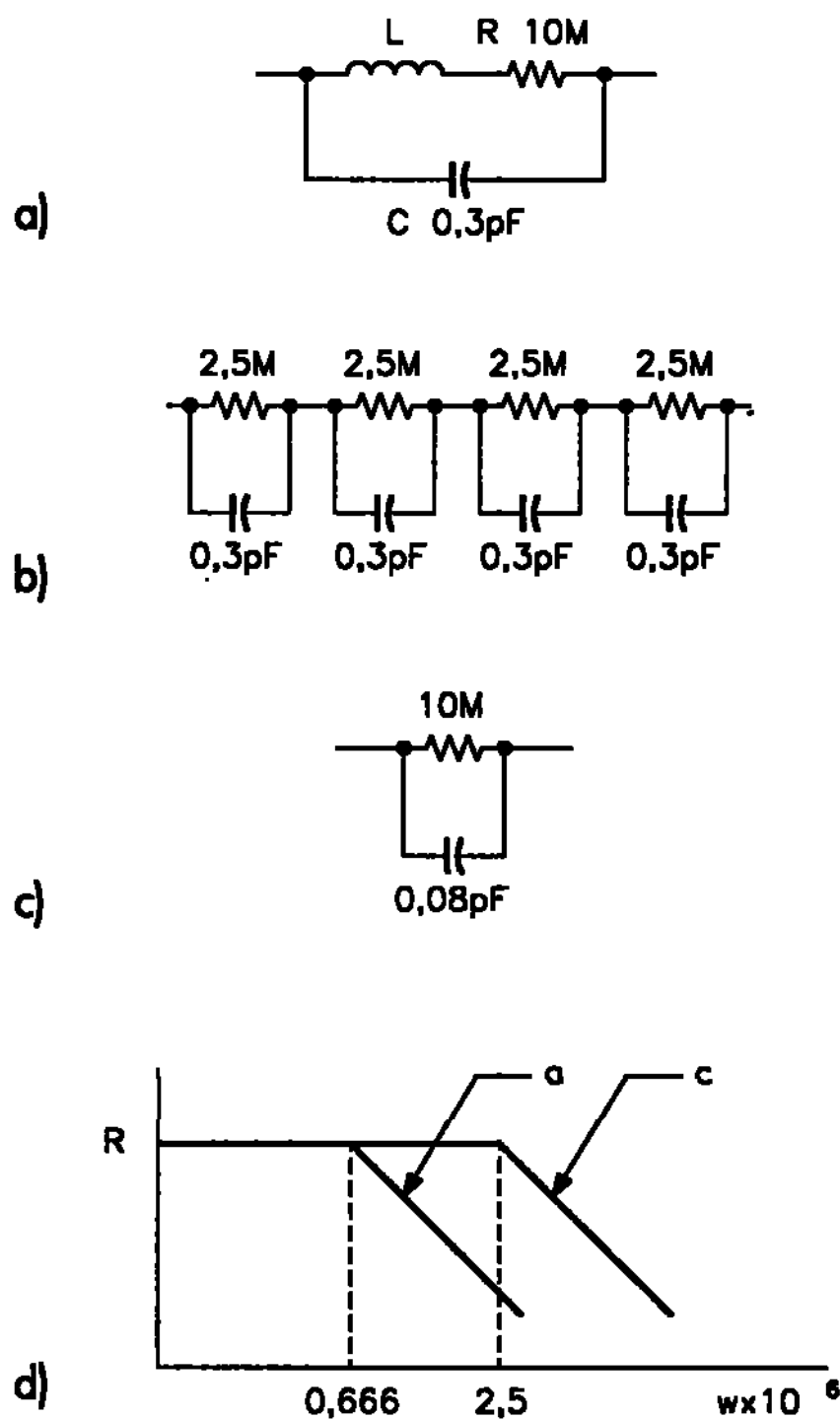


Рис. 3.3. Уменьшение паразитных емкостей

Паразитную емкость отдельного резистора (a) можно уменьшить, соединив несколько резисторов (b) последовательно при условии, что паразитной индуктивностью можно пренебречь. Емкость цепи из четырех последовательно соединенных резисторов составляет $1/4$ от емкости отдельного резистора (c), область рабочих частот резистора расширяется (d).

производства компании Allen-Bradley имел емкость 0,3 пФ, таким образом, общая емкость четырех последовательно соединенных «конденсаторов-паразитов» составила бы чуть меньше 0,08 пФ (рис. 3.3). Затем я промерил углеродистый пленочный резистор фирмы Beyschlag. Его емкость была чуть меньше – 0,26 пФ. Емкость RN60D фирмы Dale составила 0,08 пФ, то есть паразитную емкость цепи из четырех последовательно соединенных резисторов практически невозможно было бы измерить.

Неверно обобщение, что определенные типы резисторов (пленочные) всегда об-

ладают меньшей паразитной емкостью по сравнению с другими. Однако основная идея заключается в том, что, если нужно получить сопротивление с небольшой паразитной емкостью, допускается соединить последовательно несколько резисторов меньшего номинала. А если при этом проверить параметры резисторов нескольких изготовителей, то вас может ожидать приятный сюрприз.

3.3. Переменные резисторы и потенциометры

Среди переменных резисторов, так же как и среди постоянных, которые мы до сих пор рассматривали, можно выделить несколько видов и типов, таких как потенциометры с выключателем, просто потенциометры и реостаты. При изготовлении этих резисторов применяются различные резистивные материалы, к примеру графит, кермет, токопроводящие пластмассы и проволока. Как и при использовании постоянных резисторов, будьте осторожны с дешевыми углеродистыми резисторами, ТКС которых настолько плохой, что производитель предпочитает не указывать его в технической документации. Переменные резисторы имели бы плохое значение ТКС при использовании в качестве реостата, но могли бы иметь вполне приличный ТКС при использовании в качестве регулируемого делителя напряжения или потенциометра. Недавно я работал со старым операционным усилителем, в котором подстроечным резистором можно было регулировать сдвиг выходного напряжения до 100 мВ. Однако в течение четырех часов кряду величина

сдвига усилителя изменялась не более чем на ± 10 мкВ. Это потрясающий уровень стабильности – 0,01% – для углеродистого композиционного подстроечника! С другой стороны, некоторые керметные переменные резисторы обладают многими замечательными свойствами, но их не рекомендуют использовать в устройствах, где предполагается хотя бы несколько сотен циклов регулировки. К примеру, керметный переменный резистор совершенно непригоден в качестве регулятора громкости радиоприемника.

Основная проблема, связанная с переменными резисторами, заключена в их разрешающей способности или «устанавливаемости». Иногда утверждается, что определенный переменный резистор имеет «бесконечную» разрешающую способность, однако если подвести к выводам резистора напряжение 2 В и попытаться устанавливать его движок так, чтобы получить определенное напряжение с точностью в 1 мВ, то могут обнаружиться такие значения, получить которые не удастся. Вот и вся «бесконечная» разрешающая способность. Как правило, хороший потенциометр используется с разрешением 0,1%, что составляет 2 мВ для рассмотренного выше примера. Таким образом, можно уверенно рассчитывать на разрешение в 0,2%.

Под хорошей «устанавливаемостью» понимается не только возможность установить движок потенциометра в любое заданное положение, но и уверенность в том, что движок в нем останется. Мне до сих пор встречаются люди, рекламирующие многооборотные потенциометры и заявляющие об их превосходной «устанавливаемости». В следующий раз, когда вам понадобится действительно хороший потенциометр, сравните многооборотный и однооборотный варианты. Поставьте движок каждого из них в определенное положение, замерьте сопротивления, после чего стукните по обоим карандашом и скажите, на каком выставленное значение останется без изменений. Я думаю, что, скорее всего, многооборотный потенциометр как с прямолинейным, так и с круговым перемещением движка окажется в 2 или 4 раза менее точным, чем однооборотный, поскольку механическая конструкция однооборотного потенциометра более стабильна и лучше сбалансирована.

Может ли кто-нибудь привести пример, доказывающий, что многооборотный потенциометр лучше? За целый год после первого появления в печати этого вопроса я не получил на него положительного ответа, хотя продавцы многооборотных резисторов все еще заявляют, причем в самых расплывчатых выражениях: «Бесконечное разрешение – без проблем».

3.4. Номинальные режимы работы потенциометров

Как происходит отказ переменного резистора? Если приложить постоянное напряжение между движком и одним из крайних выводов потенциометра и уменьшать сопротивление, то в какой-то момент будет превышен максимально допустимый ток, проходящий через движок, что вскоре повредит или выведет из строя контакт подвижной системы. Учтите: номинальная мощность для большинства переменных резисторов определяется из предположения, что рассеивание мощности происходит равномерно по всей поверхности рабочего элемента. Если же рассеивание предельной для данного элемента мощности идет только с половины

поверхности, то этот потенциометр долго не проработает. Далее, если рассеивание такой же мощности будет производиться только четвертью элемента, то потенциометр откажет очень быстро.

К примеру, много лет назад все имевшиеся на тот период омметры работали с измерительным током порядка 50 мА при измерении резистора номиналом 1 Ом. Входной контроль 10-оборотных прецизионных потенциометров номиналом 50 кОм (стоимостью \$20) осуществлялся с помощью такого омметра. При этом техник, производивший тестирование, должен был «выкрутить» потенциометр в крайнее положение, в котором тока 50 мА хватало для того, чтобы выжечь проволоочную обмотку. После этого он писал в отчете, что потенциометр отказал. Идиотский способ входного контроля, не так ли?

Некоторые подстроечные резисторы не рассчитаны на протекание через контакт подвижной системы сколько-нибудь значительного постоянного тока. Постоянный ток – силой даже в 1 мкА – может вызвать электромиграцию, которая будет причиной либо обрыва цепи, либо роста шума и ненадежной работы потенциометра. Другие подстроечные резисторы считаются более надежными, если через контакт подвижной системы течет небольшой постоянный ток, как минимум 1 мкА, для предотвращения «сухих отказов». Углеродистые потенциометры, похоже, не подвержены ни одному из описанных выше видов отказов. Если у вас возникают вопросы, касающиеся пригодности любимых подстроечных резисторов для использования в качестве реостатов, то вам или вашему инженеру по элементной базе необходимо связаться с изготовителем этих устройств.

Как можно выявить дефекты резисторов? Самый очевидный способ – довериться обонянию. Обычно, выходя из строя, резистор сильно нагревается, и тогда резкий запах фенола может подсказать, где находится отказавший компонент. Только будьте осторожнее и постарайтесь не обжечь пальцы. Кроме того, могут встретиться ситуации, в которых резистор на самом деле не отказал, но производит впечатление работающего неправильно. Скорее всего, не все в порядке со схемой, и в самом простом случае это связано с тем, что использован резистор не того номинала. Тогда вы проверяете данный резистор, и в 90% случаях он оказывается абсолютно исправным. Обычно резистор сам по себе не отказывает. Его отказ часто является сигналом о выходе из строя транзистора или всей схемы. Если вы просто замените резистор, то новый точно так же сгорит или будет вести себя таким же странным образом, что и замененный.

В нашей лаборатории, если кто-то чувствует запах «перегретого резистора», то обязательно проверяет, знаем ли мы о проблеме. Обычно, когда я громко выясняю, у кого горит резистор, инженер или техник робко отвечает: «Я только что поджарил свою схему...» Если проблема обнаруживается в каком-нибудь приборе, то чем быстрее нам удастся отключить его от сети или достать огнетушитель, тем лучше.

Как проверить неисправность резистора? Если у вас нет другого выхода, то можно выпаять один из его выводов и просто измерить сопротивление. Однако проще померить падение напряжения $I \times R$ на нем прямо в схеме и определить, у какого именно резистора (если такой окажется) перепутан номинал. Если вы предполагаете, что резистор является термозависимым, то попробуйте нагреть его паяльником

или остудить аэрозолем, наблюдая за тем, какой эффект это производит. Некоторые полупроводниковые микросхемы работают в токовом режиме, поэтому устройства с их использованием тяжело исследовать с помощью вольтметра. В такой ситуации вам, чтобы выяснить, вызван ли сбой резистором, возможно, придется выполнить косвенные измерения. Старайтесь не забывать, что паразитная утечка может вызвать такой же эффект, что и неисправный резистор.

При проведении прецизионных измерений резисторов следует учитывать, что даже лучшие омметры, то есть те, у которых четырехпроводная схема подключения и множество разрядов на индикаторе, не будут иметь такую же точность и разрешение, которые вы можете получить, пропустив ток через стабильный образцовый резистор R_{ref} а затем через неизвестный R_x и сравнив полученные падения напряжения. Этот метод особенно хорош для резисторов с небольшим сопротивлением. Взгляните на рис. 3.4. Вы можете совершенно произвольно выбирать силу тока, проходящего через R_x .

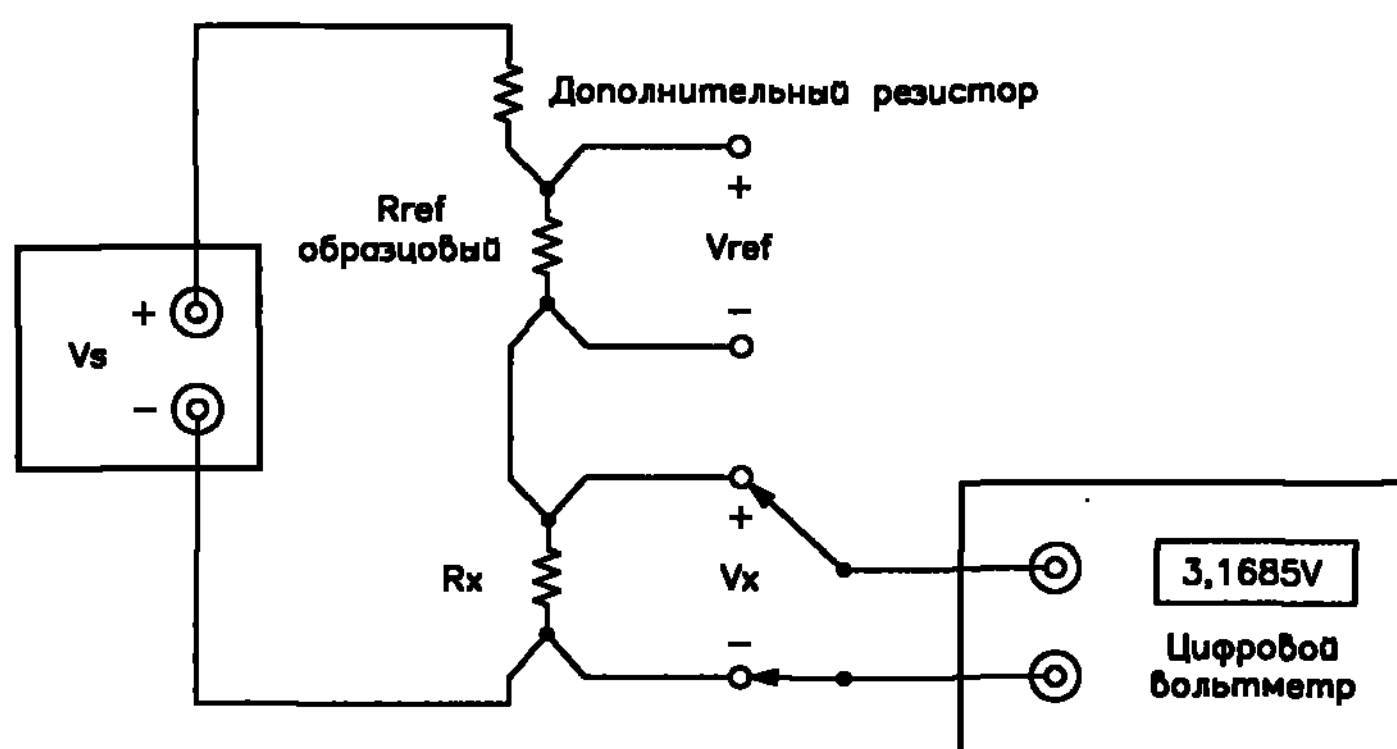


Рис. 3.4. Точное измерение сопротивления

Используя прецизионный вольтметр для измерения V_{ref} и V_x и вычислив их отношение, можно определить значение R_x намного точнее, чем в режиме измерения сопротивлений.

3.5. Осторожно: механические повреждения

Еще одним источником неприятностей могут оказаться механические повреждения резисторов. Треснувший резистор может шуметь или является причиной сбоев в работе. Если резистор подвергнется перегреву чрезмерно большим сигналом, как бывает, к примеру, при рассеивании 0,25-ваттным резистором 2 или 3 Вт, то, скорее всего, схема откажет из-за обрыва — резистор может развалиться на части, но у него не может уменьшиться сопротивление и не может произойти короткое замыкание (КЗ).

Точность или стабильность резисторов большого номинала (10^8 – 10^{12} Ом) может значительно снизиться, если на корпусе этих элементов окажется грязь или отпечатки пальцев. Чтобы резисторы такого типа и высокоомные цепи в целом

работали устойчиво, необходимо обращаться с ними аккуратно и следить за их чистотой.

Есть одна проблема, которая свойственна всем резисторам, – это эффект Зеебека (термоэлектрический эффект). Он выражается в том, что в цепи, составленной из двух разных металлов, появляется ЭДС, если два спая этих металлов имеют разные температуры. В прецизионных цепях вам следует избегать тепловых градиентов, которые могли бы образовать большой перепад температур между двумя выводами резистора. К примеру, нельзя ставить прецизионный резистор «вертикально» (вариант установки 3), как это часто делалось в старых транзисторных приемниках, ведь если на резисторе будет рассеиваться хоть что-нибудь, то один его вывод может нагреться сильнее, чем другой. У многих прецизионных проволочных и пленочных резисторов коэффициент Зеебека небольшой, в пределах 0,3–1,5 мкВ/°С. Однако избегайте применения резисторов с резистивным слоем из оксида олова, термоэлектрический коэффициент у которых может достигать 100 мкВ/°С. Если вам предстоит выбрать резисторы для устройств специального применения, в которых ошибки, связанные с термоэлектрическим эффектом, могут ухудшить работу схемы, то надо проконсультироваться с изготовителем.

Итак, вы должны знать, что при поиске неисправностей с резисторами могут быть связаны различные проблемы. Вместо того чтобы заново изобретать велосипед, поучитесь на ошибках более опытных коллег.

3.6. Когда резистор – не только резистор

Когда он – *вставка плавкая*, или *предохранитель*. Очевидно, если через резистор с небольшим сопротивлением течет слишком большой ток, что способствует расплавлению устройства и разрыву цепи, то иногда это полезно. Именно таким образом индустрия предохранителей, на которую затрачено много миллионов долларов, оберегает нас от неприятностей. Однако и предохранители могут создать нам определенные проблемы. Они не всегда перегорают именно в тот самый момент, когда это необходимо. Как пишет Ян Синклер (Ian Sinclair) в книге “Passive Components – a User’s Guide”¹: «Если вы думаете, что 1-амперный предохранитель сгорит, как только сила тока превысит 1 А, то это значит, что вы не очень серьезно относитесь к выбору предохранителей» [1].

Обычно гарантируется, что предохранители будут неопределенно долго проводить ток, не превышающий 100% номинала, но большинство из них в течение нескольких часов остаются исправными даже при токе до 120% номинала. Предохранители даже с минимальным временем срабатывания не могут разорвать цепь быстрее, чем за 10 мс при 10-кратной перегрузке или за 100 мс при двукратной. Большей скорости реакции можно добиться, если купить новые полупроводниковые предохранители с очень малым временем срабатывания. Вы сэкономите массу времени, если кто-нибудь в вашей организации – инженер по комплектующим

¹В книге Синклера содержится много полезной информации обо всех типах пассивных компонентов, и я настоятельно рекомендую ее прочесть.

или просто опытный коллега – поможет вам найти нужную информацию в каталоге предохранителей. Без помощи такого рода вам, вероятно, не удастся найти каталог изготовителя предохранителей, а если вы его и найдете, то не сумеете в нем разобраться. Графики различных параметров станут понятны после того, как вы приобретете некоторый опыт.

Использовать предохранители необязательно – современные интегральные схемы снабжаются настолько надежными ограничителями тока и системой термозащиты, что в предохранителях нет необходимости. Поэтому, увидев где-нибудь настоящий предохранитель, вы можете удивиться. Слаботочные предохранители и защиту дают слабую. Некоторые предохранители отказывают без всякой причины. Подобное происходит каждые 3–4 года в моей сушилке для одежды и каждый раз сбивает с толку мою жену. В конце концов я составил список всех симптомов, и теперь, когда перегорает предохранитель и сушилка не греет, нам не приходится тратить время хотя бы на то, чтобы понять в чем дело. Когда недавно перестала работать микроволновая печь, я слегка обеспокоился, так как наклейка на задней панели гласила: «В устройстве не используются компоненты, которые можно обслуживать неспециалистам». Когда я вскрыл печь, то в соответствующем держателе увидел сгоревший предохранитель. Безуспешно обойдя несколько магазинов электротоваров, я наконец нашел магазин компании Radio Shack. (До недавнего времени один из двух самых крупных изготовителей конструкторов и наборов для сборки готовых устройств самого разного назначения – от детекторного приемника и пробника с лампочкой и до высококачественных тюнеров-усилителей, осциллографов и компьютеров. В связи с развитием электроники активность компании на этом рынке значительно снизилась, но она продолжает торговать радиодеталями. – Прим. ред.) Здесь оказались нужные предохранители, и я понял, что *в первую очередь* должен был зайти именно сюда. Я заменил предохранитель и включил печь – сгорит ли предохранитель опять из-за какой-то серьезной неисправности, или предыдущий просто «устал»? Новый предохранитель работает уже несколько месяцев, так что проблема заключалась просто в сроке годности.

Большая часть предохранителей рассчитана на напряжение 115 или 230 В переменного тока, но не более чем на 32 В постоянного тока. Это вызвано тем, что при работе на переменном токе дуга успевает погаснуть, а на постоянном токе это невозможно. Поэтому с постоянным током высокого напряжения ситуация не так проста. Некоторые защитные прерыватели рассчитаны на напряжения постоянного тока вплоть до 65 В, но часто этого недостаточно. Фирма Heinemann выпускает предохранители серии CD, которые рассчитаны на напряжение до 125 В постоянного тока, и более мощные серии GJ, рассчитанные на напряжение до 150 В постоянного тока.

Есть еще один способ, применяемый в схемах с выпрямителями. Он заключается в том, что обмотку реле включают в цепь постоянного напряжения, а его контакты – в цепь переменного тока. А если используется питание 120 В постоянного тока, то простого выхода нет.

Сейчас можно использовать МОП транзисторы большой мощности для изготовления хороших высоковольтных сильноточных ключей, которые выключают

при перегрузке именно по току, – это электронный эквивалент предохранителя. Я разработал такой модуль, однако пока он функционирует не очень хорошо. МОП транзистор в нем сгорел. Причем два раза. Я им еще серьезно не занимался, но, когда у меня появится время, обязательно займусь и заставлю его работать. После чего напишу про это статью и опубликую ее где-нибудь, и все смогут прочесть: «Интегральный электронный предохранитель с рабочим напряжением до 200 В постоянного тока».

А пока, если вам понадобится с помощью предохранителя защитить источник питания постоянного тока, просто поставьте предохранитель в цепь вторичной обмотки трансформатора, тогда он будет работать не на постоянном, а на переменном напряжении и токе.

3.7. Дроссели и трансформаторы.

Дроссели и трансформаторы сложнее, чем резисторы. Их сердечники могут быть совершенно различных размеров и очертаний, начиная от тороидальных до броневых сердечников и от простого стержня до пакетов пластин сложной формы. В качестве сердечника могут использоваться разнообразные материалы – от воздуха до металла или разнообразных ферритов.

Я и не предполагаю рассказывать о том, как разрабатывать дроссель, трансформатор или схемы с их использованием, а собираюсь перечислить виды неисправностей и отказов, характерных для этих элементов. Например, для сердечника может использоваться материал с исключительными свойствами, однако если в сердечнике должен быть воздушный зазор, а вы недостаточно точно контролируете его толщину, то объем аккумулируемой энергии и индуктивность элемента будут изменяться в широких пределах. Если заменить сердечник трансформатора сделанным из другого материала, то заметить это будет совсем непросто. Поможет в этом деле измеритель индуктивности или измерительный мост полных сопротивлений. Но даже с такими приборами успех не гарантирован.

При измерении параметров большинства дросселей и трансформаторов, сердечники которых сделаны из ферромагнитных материалов, лучше убедиться в том, что условия измерения – напряжение и частота переменного тока, которые измерительный прибор подает на исследуемый элемент, – соответствуют тем, в которых этот элемент будет работать постоянно. Если не удастся этого сделать, то результаты измерений могут с большой вероятностью увести вас в сторону и в значительной степени усложнить задачу поиска возможных неисправностей. Явление, с которым вы наверняка столкнетесь в результате неправильно выбранных условий проведения измерений, связано с магнитным насыщением, в результате чего значение индуктивности будет ниже ожидаемого, и с потерями в сердечнике, которые могут понизить добротность (Q) дросселя. При исследовании трансформаторов убедитесь, что вы точно знаете, какую из индуктивностей, приведенных в эквивалентной схеме элементов, измеряете.

3.8. Эквивалентная схема трансформатора

Трансформатор с коэффициентом трансформации N можно представить в виде эквивалентной Т-образной схемы (см. рис. 3.5а). $N = N_1/N_2$, где N_2 – число витков во

вторичной обмотке, а N_1 – в первичной. Однако, если вы собираетесь промерить трансформатор, будет полезно постоянно мысленно смотреть на эквивалентную схему, показанную на рис. 3.5b. К примеру, индуктивность, которую можно измерить между точками А и В, будет очень большой, если точки С и D разомкнуты, но если их замкнуть, то эта же индуктивность станет очень маленькой. В данном случае вы измеряете взаимную индуктивность плюс индуктивность рассеивания первичной обмотки. Но в силу того, что обычно индуктивность рассеивания значительно (повторяю – значительно) меньше, чем взаимоиндуктивность, во втором случае вы измеряете индуктивность рассеивания первичной обмотки плюс трансформированную индуктивность рассеивания вторичной обмотки.

При работе с дросселями и трансформаторами придется анализировать токи: в любом трансформаторе или катушке индуктивности магнитный поток прямо пропорционален силе тока, а резистивные потери прямо пропорциональны квадрату этой величины. Следовательно, необходимо иметь несколько датчиков силы тока или токовых щупов, что позволит посмотреть, на что похожи формы токов. В конце концов многие из самых таинственных, уродливых и просто ни на что не похожих по форме сигналов будут связаны с катушками индуктивности. (Особенно в импульсных преобразователях.)

При отсутствии приборов, предназначенных для измерения индуктивности, подключите исследуемую катушку параллельно конденсатору известной емкости, чтобы получился параллельный колебательный контур. Если для подачи импульса тока в этот контур использовать источник с высоким выходным сопротивлением, то можно определить индуктивность исследуемой катушки из

Примечание к рис.

R_p = сопротивление первичной обмотки;

L_p = индуктивность рассеивания первичной обмотки;

C_p = распределенная емкость первичной обмотки;

L_m = взаимоиндукция (пересчитанная в первичную обмотку);

R_s = омические потери в сердечнике;

$N^2 \times R_s$ = сопротивление вторичной обмотки (пересчитанное в первичную обмотку);

$N^2 \times L_s$ = индуктивность рассеивания вторичной обмотки (пересчитанная в первичную обмотку);

C_s / N^2 = распределенная емкость вторичной обмотки (пересчитанная в первичную обмотку);

C_{ps} = межобмоточная емкость между первичной и вторичной обмотками.

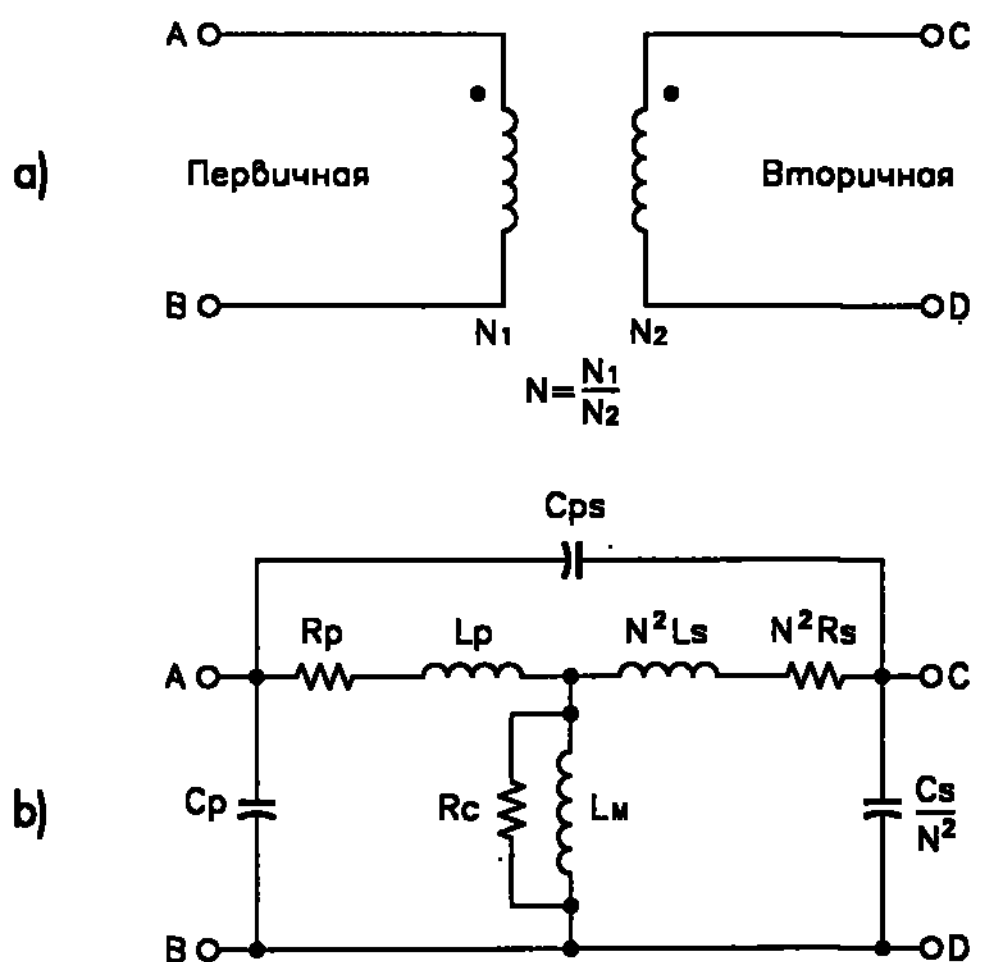


Рис. 3.5. Эквивалентная схема трансформатора

Чаще всего трансформатор характеризуется отношением числа витков в его обмотках (а). При измерении характеристик трансформатора необходимо четко представлять себе его эквивалентную схему (б). Учет воздействия каждого элемента поможет разобраться с результатами измерений.

резонансной частоты и известной емкости конденсатора: $f = 1 / (2 \pi \sqrt{LC})$. Если вы можете посмотреть формы сигналов катушки индуктивности на экране осциллографа, то сравните их с сигналами на заведомо исправной катушке. Подобный метод также достаточно эффективен для поиска короткозамкнутых витков, которые уменьшают индуктивность практически до нуля. Приборы для измерения индуктивности или добротности позволят убедиться, что исправные на вид катушки индуктивности не были необратимо повреждены в результате магнитного насыщения.

Как бы странно это ни звучало, но катушку индуктивности можно необратимо повредить, подвергнув сильному магнитному насыщению. Некоторые ферритовые тороидальные сердечники приобретают присущие им магнитные свойства только при определенном уровне намагничивания материала (определенном положении рабочей точки на кривой намагничивания), из которого они изготовлены. В результате глубокого магнитного насыщения сердечника рабочая точка может сместиться и магнитные свойства его значительно изменятся. Вероятность того, что вам удастся восстановить исходные свойства материала, близка или равна нулю. Бывает, что при работе катушки с очень большими токами сердечник нагревается до температуры, при которой его магнитные свойства также необратимо изменяются.

Вне зависимости от того, что именно вызвало порчу катушки, возможно, придется сделать то же самое, что пришлось делать мне: прикрепить к упаковкам с катушками специальный ярлык, в котором жестко потребовать не проводить их входной контроль.

Отличный способ решения этой проблемы предложил Боб Видлар. Обычно он поручал технику на входном контроле просто пересчитывать количество выводов. Ничего не *измерять*, а именно *пересчитывать*. При таком входном контроле, скорее всего, ничего испорчено не будет.

Если использовать для обмотки провод слишком малого сечения, то потери в проводах будут чрезмерными. Сопротивление обмотки можно измерить омметром, или же определить толщину провода. А если количество витков в обмотке неверное, то проверить это можно с помощью измерителя индуктивности – не забывайте, что $L \sim N^2$. При использовании омметра для измерения сопротивления катушек индуктивности и обмоток трансформаторов необходимо соблюдать осторожность – некоторые омметры пропускают через измерительную цепь столько миллиампер, что они с большой степенью вероятности могут вызвать магнитное насыщение элемента, который вы пытаетесь обмерить, и изменить его характеристики, в лучшем случае – на время. Для таких измерений надо использовать омметр, который работает с малым измерительным током.

3.9. Защита транзисторов от выбросов напряжения

При работе с катушкой индуктивности или обмоткой реле можно столкнуться с еще одной потенциальной проблемой, когда само магнитное устройство повреждено не будет, но «смерть и разрушение оставят следы» в связанных с этим устройством элементах. Угроза заключена в том, что если большой ток катушки течет через транзистор, то в момент, когда транзистор закрывается, «ответом» индуктивности

может быть всплеск напряжения, достаточно высокого для того, чтобы повредить или полностью вывести из строя практически любой транзистор.

Этой неприятности можно избежать, подключив параллельно катушке цепь защиты, например диод, RC-цепочку, стабилитрон или же цепь из нескольких перечисленных элементов, – они поглотят лишнюю энергию. Использование подобной защиты – очевидная мера предосторожности, однако каждый год мне встречаются схемы управления реле, в которых отсутствует цепь, защищающая транзисторы от перегрузок. Какое-то время в таких условиях транзистор, может быть, и поработает, но недолго.

Самые маленькие индуктивности называются бусинами. Они почти такого же размера и формы, что носят на шее красавицы, но производятся из ферритов различных типов. Их размеры таковы, что намотать на них можно от силы два или четыре витка провода. Бусины часто надевают на выводы баз и эмиттеров транзисторов для того, чтобы предотвратить их самовозбуждение. Эти элементы не только выполняют роль индуктивности, они также вносят потери на высоких частотах, тем самым демпфируя «звон». Подбор подходящих бусин – задача чисто эмпирическая, сидя над решением которой, можно протереть штаны. Однако обладающие большим опытом в этой области разработчики добиваются отличных результатов. Я не встречал ни одной книги или журнала, где рассматривалась бы эта тема (за исключением, быть может, упоминания в одно предложение). Просто нужно взять коробку ферритовых бусин и, тупо перебирая одну за другой, приступить к экспериментам на макете.

Трансформаторы обычно подвержены тем же неприятностям, что и катушки индуктивности. Кроме того, у трансформатора может оказаться неверным соотношение числа витков или же перепутана полярность обмотки. А если у вас недостаточно опыта работы с обмоточными проводами, то может получиться так, что обмотки будут плохо изолированы друг от друга. Большинство ферритовых материалов являются изоляторами, но некоторые все-таки проводят ток. Таким образом, если вы сделали трансформатор с тороидальным сердечником, у которого первичная и вторичная обмотки расположены на противоположных сторонах тороида, и повредили изолирующую оболочку сердечника, то, возможно, изоляция между обмотками будет плохой. Если изолирующее покрытие недостаточно надежное, то, видимо, стоит обмотать сердечник лентой из изолирующего материала.

К счастью, провести сравнение заведомо исправного трансформатора с проверяемым совсем несложно. Если подать одинаковый входной сигнал на первичные обмотки обоих трансформаторов, то с легкостью можно определить, одинаковы ли вторичные обмотки, правильно ли намотаны и в том ли направлении включены. Если вы побаиваетесь подать полное напряжение сети и промерить напряжения на трансформаторе, то не стоит беспокоиться – можно подать на первичную обмотку сигнал от функционального генератора амплитудой всего в несколько вольт (для предотвращения магнитного насыщения или перегрузки последовательно с трансформатором лучше подключить резистор и/или конденсатор) и при этом видеть, как «себя ведут» различные обмотки.

Две распространенные проблемы связаны с силовыми трансформаторами. Первая относится к использованию большого сглаживающего конденсатора и большого силового трансформатора с высоким КПД. Когда вы включаете сетевое напряжение,

пусковой ток часто выводит из строя предохранитель. Можно было бы поставить предохранитель на больший ток, но в таком случае придется все проверять, чтобы убедиться, что номинал предохранителя не слишком велик и обеспечивает защиту прибора. В качестве альтернативы можно сделать трансформатор так, чтобы вторичная обмотка имела чуть большее сопротивление. Нужно использовать в обмотке более тонкий провод или установить последовательно с ней небольшой резистор.

Другой подход, часто используемый в телевизорах, заключается в том, что в цепь питания от сети включается низкоомный термистор (терморезистор с отрицательным ТКС). Сразу после включения питания он имеет номинальное сопротивление и пусковые токи ограничиваются. Далее термистор быстро нагревается и его сопротивление падает до пренебрежимо малого значения. Таким образом, через небольшой промежуток времени схема работает с полной отдачей. Если наша схема – импульсный источник питания, то управляющая интегральная микросхема должна обеспечивать режим плавного запуска при включении. В таком случае эта схема гарантирует, что источник питания не будет потреблять чрезмерный ток, определяемый быстрым зарядом конденсаторов выходных фильтров. Несмотря на это, необходимо соблюдать осторожность при использовании термисторов для ограничения пускового тока: после отключения питания не следует сразу же снова его включать, надо подождать, чтобы термисторы остыли. У горячего термистора сопротивление очень мало, и он не сможет ограничить пусковой ток, поэтому опять есть риск сжечь предохранитель или повредить выпрямитель.

Вторая общая проблема, связанная с трансформаторами питания, относится к случаю, когда в выходном фильтре используется конденсатор небольшой емкости. В нашей старой технической документации на микросхемы LM317 и LM350 в качестве примера зарядного устройства для батарей мы приводили схему с конденсатором сглаживающего фильтра емкостью всего 10 мкФ. При этом исходили из того, что если напряжение на вторичной обмотке уменьшается каждые 8 мс (для сети 60 Гц), то опасность перехода стабилизатора в насыщение отсутствует.

Данное предположение было корректно, если бы нам не встречались вышедшие из строя стабилизаторы, которые выгорали при включении питания.

После длительных исследований мы обнаружили, что причиной неприятностей оказался трансформатор: если питание выключалось точно в «неподходящий» (при максимуме синусоиды) момент одного периода, в стальном сердечнике трансформатора мог сохраниться магнитный поток большой величины. Затем, если питание включалось снова в «неподходящий» момент цикла, магнитный поток продолжал нарастать до тех пор, пока сердечник трансформатора не достигал состояния магнитного насыщения, в результате чего на его вторичной обмотке возникал выброс напряжения амплитудой 70–90 В. Этого выброса хватало для того, чтобы повредить или вывести из строя микросхему стабилизатора. Для того чтобы избавиться от этого эффекта, нужно было вместо конденсатора емкостью 10 мкФ поставить другой, емкостью не менее 1000 мкФ. Эта замена снизила вероятность отказа с 0,25% практически до нуля.

Еще одна проблема возникла, когда микросхемы LM317 использовались в качестве зарядного устройства для батарей. Если выход зарядного устройства закорачивался на землю, то через LM317 начинал течь нарастающий ток. Однако

под действием индуктивности трансформатора ток мог расти до тех пор, пока стабилизатор LM317 не входил в режим ограничения тока, после чего пропускать больший ток уже не мог. В этот момент напряжение на вторичной обмотке подскакивало до очень высокого уровня, в результате чего микросхема LM317 выходила из строя. Включение конденсатора емкостью 1000 мкФ позволило решить и эту проблему.

3.10. Перегрев индуктивных элементов

Как искать неисправную катушку индуктивности или трансформатор? Мы уже обсуждали несколько механизмов, действие которых приводит к тому, что индуктивность или добротность катушки будут ниже соответствующих параметров исправных деталей. И точно так же, как при поиске неисправных резисторов, по запаху можно найти сильно перегретый дроссель. Причинами перегрева могут быть дефектный сердечник, короткозамкнутый виток, неправильно выбранное сечение провода – все, что может привести к увеличению потерь. Разрыв в обмотке, как и замыкание первичной обмотки на вторичную, легко определить с помощью омметра. Если порядок намотки у одного из трансформаторов был изменен на другой, то вы не сможете этого заметить, если не проверите изделие в схеме, которая имитирует условия реального применения.

Можно попробовать выявить подобное расхождение, подавая короткие импульсы тока на оба трансформатора. Было замечено, что изменения в порядке намотки – даже если изменено только направление, вместо намотки по часовой стрелке использована намотка против часовой стрелки – вызывают значительные изменения параметров и области применения.

Обмотки с плотной намоткой, такие как бифилярные и в виде витой пары, имеют гораздо более высокую магнитную связь и меньшую индуктивность рассеивания, чем полностью отдельные первичная и вторичная обмотки. Но наряду с повышением магнитной связи увеличивается и межобмоточная емкость, а большая межобмоточная емкость в трансформаторах часто нежелательна. Опытные разработчики трансформаторов взвешивают все возможные варианты и знают множество конструктивных приемов, к примеру использование особых пи-обмоток и специальных проводов-литцендратов. Следует знать, что по большей части эти специальные методы дают отличный результат; и если правильно поставить задачу перед разработчиками трансформаторов, то они смогут предложить потрясающие решения.

Недавно я читал об инженере, который разработал элегантный экран, сделанный из пермаллоя (мю-металла). Но этот экран не сразу встал на место, поэтому технику пришлось слегка постучать по нему молотком. Когда инженер включил схему, обнаружилось отсутствие экранирования и создалось впечатление, что экран сделан из картона. После длительных исследований инженер понял, что мю-металл, который стоит около \$2 за 15 квадратных дюймов, превратился в абсолютно бесполезную железку после того, как его мяли, гнули и били по нему молотком. Инженеру пришлось признаться, что на мю-металле были наклейки, предупреждавшие о том, что материал нельзя прессовать, сгибать и бить по нему молотком. Так что запомните: в любой области электроники могут встретиться проблемы

с катушками индуктивности и магнитными материалами, решая которые, можно попросту поседеть.

3.11. Влияние внешних магнитных полей

Не так давно возникла одна проблема, иллюстрирующая слабые стороны в конструировании катушек индуктивности. Инженеры-разработчики нашей компании собрали несколько импульсных преобразователей постоянного тока для работы от источника напряжением 5 В и обеспечения нужного нам питания с различными напряжениями, например +15 В или –15 В постоянного тока. Один инженер сделал свой преобразователь, используя самые дешевые детали, в том числе дроссель индуктивностью 300 мкГн, намотанный на ферритовом стержне. Другой инженер собрал ту же самую базовую схему, но использовал катушку с тороидальным сердечником, стоящую немного дороже. Каждый из них провел полное обследование преобразователя – оба устройства работали корректно. После этого инженеры поменялись макетами. Данные, получаемые на преобразователе, содержащем катушку с тороидальным сердечником, были стабильны. Но им обоим не удалось повторить результаты, полученные при проверке более дешевой модели. После того как специалисты несколько часов крутили устройство в руках и ковырялись в его макете, удалось выяснить, что дроссель на стержне генерировал очень мощное магнитное поле, которое влияло на результаты всех измерений переменного напряжения и тока. А в случае с тороидальным сердечником магнитное поле оказалось заключенным внутри сердечника и на результаты измерений не влияло. Инженеры пришли к следующему выводу: они могут рассказать, как построить самый дешевый преобразователь напряжения, но при его использовании все близко расположенные цепи будут подвергаться воздействию столь мощного магнитного поля, что использовать преобразователь бессмысленно.

Разрабатывая прецизионный прибор для сложных исследований, я и не пытаюсь встроить источник питания в основной блок. Мне отлично известно, что магнитные поля даже от самого высококачественного силового трансформатора делают невозможным проведение измерений с малым уровнем шумов, а тепло от трансформатора и стабилизаторов понизит точность прибора. Вместо этого я собираю отдельный блок питания и подключаю его к основному блоку кабелем длиной до трех футов. В результате тепло и магнитное излучение благополучно рассеиваются далеко от моих прецизионных схем.

Литература

Passive Components – A User's Guide, Ian Sinclair, Heinemann Newnes, Halley Court, London, England. 1990, с. 225. Книгу можно заказать по адресу: Butterworth-Heinemann, 80 Montvale Avenue, Stoneham, Mass. 02180.

4. ПРОБЛЕМЫ С КОНДЕНСАТОРАМИ

В предыдущих главах мы разобрались с тем, как должен размышлять хороший специалист при поиске неисправностей в аналоговых схемах, проверили наличие измерительной техники и обсудили проблемы, связанные с резисторами, катушками индуктивности и трансформаторами. Теперь раскроем некоторые секреты часто недооцениваемого класса радиодеталей – конденсаторов. К сожалению, практически ничего из того, что необходимо знать о проблемах конденсаторов, ни в одной книге не отражено, даже в технических условиях и другой документации на них.

Конденсаторы заслуживают особого внимания. Мы считаем их, подобно резисторам, пассивными элементами. Но если зарядить высококачественный конденсатор, к примеру полипропиленовый емкостью 47 мкФ, до напряжения 10 В, а затем на две недели уехать в отпуск, то по возвращении напряжение на нем не должно снизиться более чем на 20% или даже на 10%. В конденсаторах может содержаться достаточно энергии для того, чтобы питать нановаттную схему в течение нескольких часов или в течение меньшего срока обеспечивать свечение светодиода. Назвать элементы со столь исключительными свойствами «пассивными» – несправедливо!

Обычные алюминиевые электролитические конденсаторы в цепях питания чаще всего применяют для фильтрации и развязки. Во времена электронных ламп «электролиты» часто использовались при напряжениях 150, 300, 500 В и даже более. С такими старинными схемами связано несколько общих проблем. Во-первых, если напряжение на конденсаторе сильно превышает 350 В, то его надежность значительно ниже, чем надежность такого же конденсатора, напряжение на котором ниже 350 В. Во-вторых, если какое-нибудь старое устройство не включалось в течение нескольких лет, то было бы благоразумно подавать на него напряжение постепенно, медленно повышая с помощью регулируемого автотрансформатора так, чтобы прокладки, пропитанные электролитом, успели «набрать форму». Если вы сразу подадите полное рабочее напряжение, то старые конденсаторы могут отказать.

Я хотел бы еще раз напомнить, что при работе с высоковольтными цепями следует держать щуп одной рукой, а вторую в этот момент положить в карман. Нельзя, чтобы ваше тело было заземлено в каких-либо других местах, при этом надо стоять или сидеть на изолирующей прокладке или сухом материале. Эти предосторожности помогут избежать серьезных травм от удара током. Когда я начинаю работать с высоковольтной схемой, то впаиваю в нее неоновую лампу и последовательно с ней резистор сопротивлением 100 кОм между шинами источника высоковольтного питания в качестве маяка, напоминающего о том, что напряжение на данной схеме *значительно* превышает 15 В. Во все низковольтные схемы я постоянно лезу руками, но на горящую неоновую лампу у меня уже выработался условный рефлекс.

После работы с высоковольтным источником питания вы можете решить, что в целях безопасности стоит замкнуть выводы фильтров через резистор в несколько сотен ом, – будьте осторожны. Через несколько минут после этого напряжение на конденсаторах может вновь возрасти до 60–80 В. Частичное восстановление напряжения на разряженном конденсаторе является результатом «натекания» или эффекта диэлектрической абсорбции, заставляющего диэлектрик конденсатора «помнить», до какого напряжения конденсатор был заряжен в последний раз. В высоковольтном оборудовании параллельно каждому большому высоковольтному сглаживающему конденсатору было бы разумно устанавливать резисторы мощностью 2 Вт и сопротивлением в несколько сотен килоом, через которые заряд мог бы стекать постоянно, и вероятность поражения током снизилась бы [1].

Последняя из проблем, связанных со старым оборудованием на электронных лампах, заключается в том, что под воздействием тепла возможно высыхание электролита в конденсаторах, приводящее к снижению их емкости. Это четко проявляется в виде чрезмерных пульсаций или «фона» различных сигналов и, конечно, на выходе нестабилизированных источников питания.

Несмотря на то что я представил перечисленные неприятности как проблемы, связанные со старым оборудованием, следует учитывать их даже в современных разработках.

Важнейшим для современных схем источников питания является выбор такого конденсатора фильтра, эффективное последовательное сопротивление которого оставалось бы малым во всем диапазоне рабочих температур и частот. В противном случае из-за падения напряжения (эффективный ток фильтра, умноженный на активную составляющую этого последовательного сопротивления) может произойти чрезмерный саморазогрев конденсатора. И если тепло от него не отводить, его температура возрастет и он быстро выйдет из строя. Чрезмерный нагрев – это одна из основных причин низкой надежности электролитических конденсаторов.

К примеру, в сглаживающих конденсаторах после двухполупериодного выпрямителя, который работает от сети переменного тока частотой 60 Гц (или 50 Гц), присутствует пульсация тока частотой 120 Гц (или 100 Гц). Некоторые производители устанавливают для своих конденсаторов рабочий ток, исходя из эффективных 2 А на каждые 1000 мкФ. При выходном токе источника постоянного напряжения, равном 1 А, эффективное значение тока в конденсаторе составляет

примерно $2A_{\text{эфф}}$, и данная пропорция согласуется с выведенным эмпирическим путем правилом для обычного двухполупериодного мостового выпрямителя: необходимо использовать в фильтре конденсатор емкостью не менее 1000 мкФ на 1 А выходного тока постоянного напряжения.

При частоте 20 или 40 кГц, что соответствует частоте пульсаций тока в фильтрах многих импульсных источников питания, последовательное сопротивление конденсатора будет больше. Таким образом, обычный конденсатор емкостью 1000 мкФ не подойдет даже при токах, эффективное значение которых не превышает 1 А_{эфф}. Если вы хотите использовать в качестве фильтра в импульсном источнике питания непременно конденсатор, предназначенный для работы на частоте 120 Гц, тогда стоит связаться с изготовителями конденсаторов и запросить у них данные или рекомендации по применению таких устройств на высоких частотах.

Безусловно, если вы установите электролитический конденсатор в обратной полярности и подадите на него рабочее напряжение, его надежность резко снизится, а отказ может проявиться самым ужасным образом. Так что будьте, пожалуйста, осторожны при работе с мощными источниками питания и фильтрующими конденсаторами большой емкости, которые могут накапливать значительную энергию. Надевайте защитные полумаски или используйте защитные очки, так как конденсатор в мощном источнике питания может взорваться именно в тот момент, когда вы будете его разглядывать. Один мой приятель отметил, что 6-вольтовый электролитический конденсатор емкостью всего несколько микрофард может взорваться с силой, равной выстрелу из дробовика, если подать на него 6 В постоянного тока в обратной полярности или 6 В переменного тока.

Итак, еще раз повторю: будьте очень осторожны при работе с полярными электролитическими конденсаторами.

4.1. Неполярные конденсаторы

Можно использовать и неполярные электролитические конденсаторы, алюминиевые или танталовые. Они больше по размерам и дороже, чем обычные полярные электролитические конденсаторы, поэтому применяются довольно редко. Но не встречались ли вам небольшие «электролиты» с тремя выводами, не так давно появившиеся на рынке? Центральный вывод соответствует положительному электроду, два других – отрицательному. Такая конфигурация не только обладает меньшей паразитной индуктивностью, но также позволяет устанавливать эту деталь на плате двумя способами, и оба будут верными – ошибиться невозможно!

Большинство характеристик танталовых конденсаторов соответствует характеристикам алюминиевых электролитических конденсаторов, а за те деньги, что вы платите дополнительно, получаете меньшую утечку и несколько меньшее эквивалентное последовательное сопротивление. Инженеры-разработчики хотели бы использовать танталовый конденсатор и высокоомный резистор в схемах выдержки времени. Но когда они пытаются приобрести танталовые конденсаторы с таким уровнем утечки, чтобы схема была всегда и гарантированно работоспособна, то начинают сильно возмущаться, если выясняется, что никто не заинтересован в продаже подобных радиокомпонентов. Ясное дело – если бы вы были производителем танталовых конденсаторов и кто-нибудь попросил бы вас измерять

утечки, то вы от этого сразу бы отказались, так как организация подобных проверок очень сложная и дорогая процедура.

Несмотря на то что утечки обычно очень незначительны, никто не желает ни заниматься измерением этого параметра при производстве конденсаторов, ни гарантировать его уровень на весь срок службы конденсатора.

Пленочные конденсаторы спиральной или пластинчатой конструкции находят широкое применение в различных областях – от малогабаритных разделительных конденсаторов до больших, используемых в мощных фильтрах. Самыми интересными из «внутренностей» конденсаторов являются различные диэлектрики. Часто разработчики используют конденсаторы из полиэфирной пленки, или полиэтилентерефталата. Еще его часто называют майларом – по торговой марке компании E.I. DuPont de Nemours and Co. При прогреве схемы ее параметры «плавают» в пределах 2–3%. Причина нестабильности – скорее всего, конденсатор с диэлектриком из полиэтилентерефталата. Его температурный коэффициент емкости (ТКЕ) составляет от 600 до 900 $\text{млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, что в десять раз превышает аналогичный параметр металлопленочных резисторов.

Если вы откажетесь от идеи использовать полиэтилентерефталат и попытаетесь использовать полистирол, полипропилен или тефлон (это тоже торговая марка компании DuPont, в российской литературе часто используется название фторопласт), то ТКЕ будет меньше и составит приблизительно 120 $\text{млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Полистирол и полипропилен имеют малые утечки и характеризуются хорошим уровнем диэлектрической абсорбции – почти такими же, как фторопласт, самый лучший со всех точек зрения материал [1]. Однако фторопласт очень дорог и компоненты на его основе имеют большие габариты. При работе с полистиролом нужно соблюдать осторожность: максимальная температура, которую он выдерживает, составляет $+86^{\circ}\text{C}$, и если не принять особые меры предосторожности по защите конденсатора от перегрева, то его можно повредить при обычной пайке «волной». Хороший ТКЕ можно получить, используя поликарбонат, полисульфон и полифенилен – около $+100 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Достаточно благозвучные названия создают впечатление, что эти полимеры должны быть просто отличными материалами, но на самом деле для них характерен более высокий уровень диэлектрической абсорбции. Стекло и фарфор – это диэлектрики, которые, судя по названию, должны обладать какими-то удивительными характеристиками и исключительной диэлектрической абсорбцией, но, к сожалению, это не так.

Много лет назад при изготовлении конденсаторов спиральной конструкции использовалась промасленная бумага, но вам вряд ли встретятся компоненты такого типа, если, конечно, вы не столкнетесь с антикварными радиоприемниками. Эти конденсаторы были «милыми толстушками», применявшимися только как разделительные в радиоприемниках низкого и среднего класса¹.

4.2. Обкладки пленочных конденсаторов

Теперь давайте обсудим различия между полиэтилентерефталатными конденсаторами с фольговыми и металлизированными обкладками. Конденсаторы первого

¹ Сегодня многие любители «Hi End аудио» будут яростно спорить с этим утверждением автора. – Прим. ред.

типа состоят из чередующихся слоев полимерной пленки и металлической фольги, и пленка, и фольга имеют толщину в несколько десятков тысячных долей дюйма. Такая конструкция позволяет выпускать высококачественные конденсаторы нормальных размеров, и доступные по цене. Технология изготовления конденсаторов с металлизированными обкладками несколько иная: на очень тонкую полиэтилентерефталатную пленку наносится очень тонкий слой металла. Данная конструкция позволяет при заданной емкости и номинальном напряжении получить еще более компактные конденсаторы, но нанесенный слой металлизации настолько тонок, что допустимая плотность тока много ниже, чем для конденсаторов с фольговыми обкладками. Это имеет как определенные преимущества, так и некоторые недостатки. Если в полимерной пленке полиэтилентерефталатного конденсатора с металлизированными обкладками возникнет точечный микропробой, то по слою металлизации, расположенному вокруг, пойдет ток столь высокой плотности, что металл испарится как обычный плавкий предохранитель, и пробой исчезнет.

В течение многих лет небольшие по размеру и доступные по цене конденсаторы с металлизированными обкладками широко применялись в ламповых телевизорах. Конденсаторы этого типа после микропробоев могли восстанавливаться неоднократно. Однако при небольшом напряжении энергии, накопленной в конденсаторе, может оказаться недостаточно для того, чтобы устранить пробой. Поэтому надежность таких конденсаторов при низких напряжениях часто заметно снижена, по сравнению с номинальным напряжением. Можно уверенно использовать конденсатор с металлизированными обкладками в телевизионной схеме, работающей под напряжением 100 В, но никак не в схеме с питанием от 2 В. К счастью, в наше время выпускаются очень надежные конденсаторы с металлизированными обкладками из поликарбоната, полиэтилентерефталата и полипропилена, которые прекрасно подходят для применения как в низковольтных, так и в высоковольтных устройствах. Как-то в одном из справочных листков на конденсаторы я вычитал интересную информацию, что при небольшом напряжении микропробой устраняется в результате окисления сверхтонкого слоя металлизации.

Когда старинные конденсаторы с металлизированными обкладками в телевизорах начинают стареть и портиться, сигнал сильно зашумляется из-за процессов «ликвидации» микропробоев.

При использовании в качестве разделительных «сухих» танталовых конденсаторов (объемно-пористых) «прочистка» микропробоев может вызывать сильные шумы. Так что эти детали теперь редко используют в схемах усилителей низкой частоты. Аналогичным образом можно использовать электролитический конденсатор при небольшом отрицательном напряжении (до $-0,5$ В) без вреда и проблем. Но! Один приятель рассказал мне о том, как он однажды включил разделительный электролитический конденсатор при обратной полярности и напряжении около 2 В. В результате переполюсовки этот конденсатор стал генерировать все виды низкочастотных шумов и импульсных помех. Итак, чрезмерный уровень шума – часто признак какой-то неисправности, возможно, «конденсатор пытается сообщить» о неправильном режиме своей работы или о перепутанной полярности.

4.3. Выводы пленочных конденсаторов

Еще одна особенность пленочных конденсаторов – два варианта конструкции выводов от обкладок: с «выпуском» фольги и без него. Для монтажа выводов большинства дешевых пленочных конденсаторов используются только концы длинных полос металлической фольги. А вот в пленочном конденсаторе с «выпуском» фольга одной из обкладок выступает за край пленки диэлектрика с одной стороны, а фольга другой обкладки – с другой стороны, контакт с выводами получается по всей длине пленки, и при этом паразитные сопротивление и индуктивность минимальны (рис. 4.1).

Такая конструкция отлично подходит для конденсаторов, которые должны иметь небольшое эквивалентное последовательное сопротивление для использования в высокочастотных фильтрах. Если заменить обычно использующиеся в них конденсаторы устройствами без «выпуска», то эффективность фильтров значительно снизится.

Ниже описаны несколько методов конструирования и особенности некоторых диэлектриков. Что очень важно для правильного выбора и использования конденсаторов? Если решительно настроенный агент по закупке комплектующих захочет кое-что заменить, чтобы снизить цену или упростить поставки, то инженеру по комплектующим или самому разработчику этой схемы, возможно, придется проделать большую работу и убедиться, что предлагаемая замена не приведет к дополнительным проблемам. Если подобная замена уже выполнена, то при появлении проблем начинать поиск неисправности стоит именно с детали «по замене». Использование конденсатора, у которого эквивалентное последовательное сопротивление больше, чем планировалось, может привести к возникновению колебаний в петле обратной связи. Это возможно, если конденсатор с «выпуском» заменен конденсатором обычной конструкции. Замена указанных инженером-разработчиком конденсаторов на другие, с более высоким эквивалентным последовательным сопротивлением, может также привести к тому, что фильтры не будут должным образом сглаживать пульсации.

Еще одним следствием слишком большого эквивалентного сопротивления является перегрев и дальнейший отказ конденсаторов – они, конечно, пассивные элементы, но, как видите, простыми их явно назвать нельзя.

Применение в конструкции конденсаторов «выпусков» фольги не только снижает эквивалентное последовательное сопротивление, но и уменьшает паразитную индуктивность. Как отметил Мартин Джилз (Martin Giles), один из моих друзей, после прочтения черновика моей рукописи о поиске неисправностей: «Пиз, ты действительно хорошо понимаешь, что происходит, если речь идет о постоянном токе или же о токе, частота которого лишь чуть выше, чем у постоянного». Я ответил ему: «Так оно в общем-то и есть, но что ты сам думаешь по этому поводу?» По его мнению, при разработке высокочастотных и других типов быстродействующих схем необходимо располагать конденсаторы и иные элементы очень плотно, так чтобы паразитные индуктивности были малыми и легко предсказуемыми. Он абсолютно прав – от расположения на плате элементов быстродействующей,

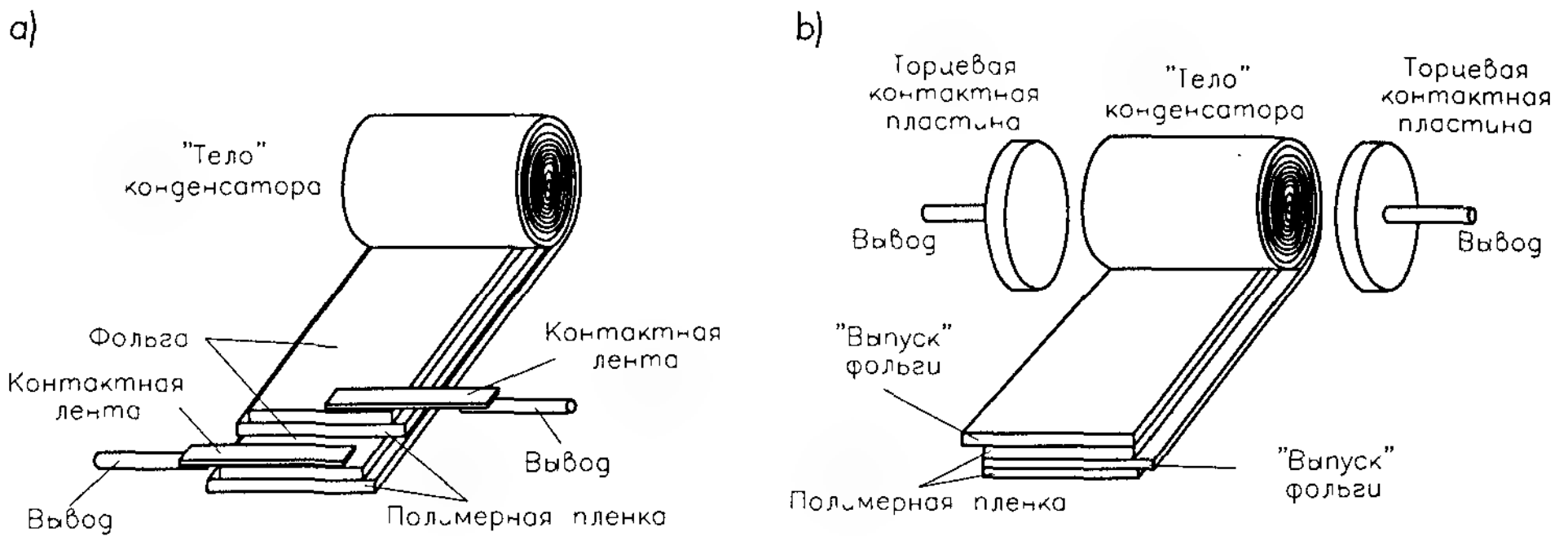


Рис. 4.1. Конструкции пленочных конденсаторов

Если выводы подсоединены к одному концу длинной ленты фольги, часть этой ленты будет на 3–6 метров удалена от выводов. Последовательное R и паразитная L большие. Подобная конструкция хорошо подходила для разделительных конденсаторов низкочастотных схем, но сейчас применяется редко (а). Если выступающие края фольги обжимаются вместе, ни один из участков конденсатора не удален больше чем на 2–5 см от выводов и контактов. В настоящее время при производстве большей части пленочных конденсаторов применяется конструкция с «выпуском» фольги (b).

с малым временем установления, или высокочастотной схемы во многом зависят ее характеристики. Конденсаторы, используемые в таких схемах, должны быть компактными и иметь короткие выводы. По этой причине часто используются керамические или серебряно-слюдяные конденсаторы.

Ежегодно миллионы керамических конденсаторов применяются в электронных устройствах различных типов. Существует три основных класса этих элементов: конденсаторы типа «большой ТКЕ», конденсаторы типа «стабильный ТКЕ» и конденсаторы с группами ТКЕ C0G или NP0.

Конденсаторы первого типа, имеющие характеристики Z5U, позволяют при небольших габаритах получать большую емкость, к примеру 10^6 пФ у конденсатора площадью в 2 см^2 и толщиной 4 мм. И это очень хорошо. Плохо то, что емкость элементов, имеющих температурные характеристики Z5U, падает на 20% номинала, если температура окружающего воздуха выходит за пределы $0\text{--}55^\circ\text{C}$, и на 60% номинала, если температура выходит из диапазона $-25\text{...}+90^\circ\text{C}$. Кроме того, диэлектрику свойственны плохой тангенс угла потерь, посредственный уровень утечек и коэффициент напряжения. Однако ни один из этих недостатков не препятствует использованию конденсаторов в качестве элементов развязывающих фильтров на выводах питания практически каждой интегральной микросхемы в мире. Для этого нужно очень много конденсаторов!

Керамические конденсаторы имеют одно свойство, которое одновременно является и преимуществом, и недостатком. Обычно эквивалентное последовательное сопротивление такого конденсатора составляет не более 0,1 Ом. Таким образом, если при работе цифровой интегральной схемы ток потребления может на несколько наносекунд достигать 50 мА, то малое последовательное сопротивление окажется очень кстати: оно поможет избежать кратковременных провалов

напряжения на шине питания. Для того чтобы получить хорошую развязку и небольшую индуктивность, необходимо при установке конденсатора оставить выводы минимальной длины. Тем не менее если параллельно соединить 10 интегральных схем и 10 керамических конденсаторов развязки, то получится длинный резонансный LC-контур (рис. 4.2), в котором шины питания выполняют роль высокодобротной катушки индуктивности между каждой парой конденсаторов развязки. Когда повторяющиеся импульсы воздействуют на подобный резонатор, могут возникнуть колебания достаточно большой амплитуды, что вызовет значительное зашумление шины питания. Это может быть особенно опасно, если частота повторения сигнала близка к резонансной частоте получившегося LC-контура.

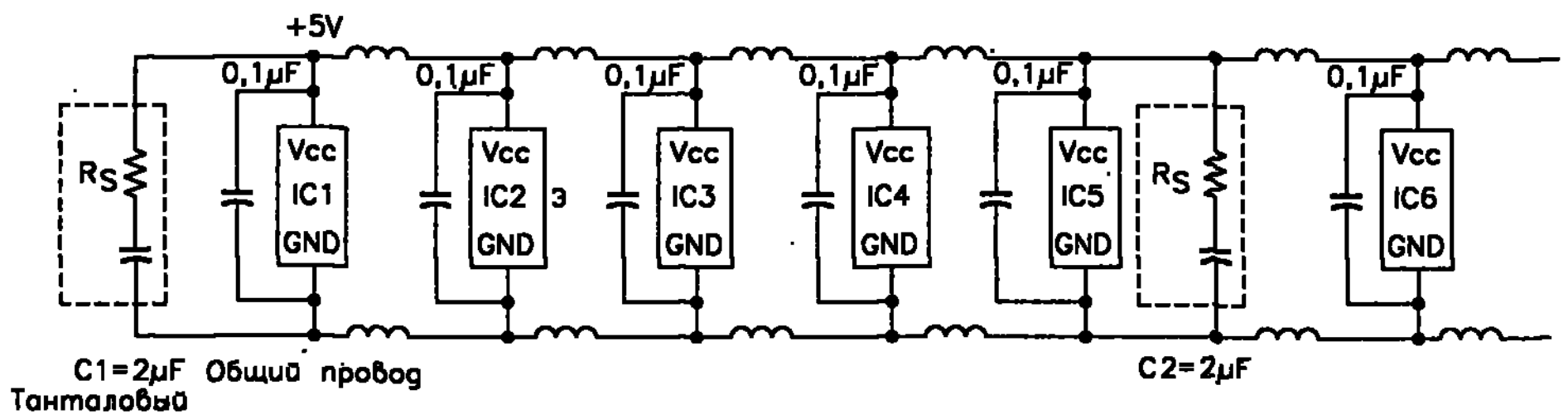


Рис. 4.2. Эквивалентная схема цепи питания

Один из эффективных способов борьбы – размещение на шине питания электролитических конденсаторов С1 с эквивалентным сопротивлением $R_s = 1$ Ом, которые эффективно демпфируют колебания, вызванные повторяющимися импульсами.

Примечание к рис.

R_{Σ} – эквивалентное последовательное сопротивление;

GND – вывод «общий» микросхемы.

И не забывайте, что у конденсаторов, обладающих температурными характеристиками Z5U, неважный температурный коэффициент. По мере прогрева схемы дело может дойти даже до того, что частота квазирезонанса паразитного контура в цепи питания станет кратной тактовой частоте системы!

Стандартное решение для устранения этой неприятности – установка танталовых электролитических конденсаторов развязки общей емкостью 2 мкФ или алюминиевых электролитических конденсаторов общей емкостью 20 мкФ на каждые три – пять интегральных микросхем (если вы не убедитесь в обратном). Это отличный прием, проверенный на практике. Эквивалентное последовательное сопротивление у электролитического конденсатора обычно равно 1 Ом, и этого достаточно для того, чтобы «погасить» звон. Некоторые считают, что такое сопротивление слишком велико для использования его в развязывающих фильтрах, но они не понимают самой сути проблемы. Я прочитал несколько рекламных заявлений изготовителей конденсаторов, в которых утверждалось, что их керамические конденсаторы для развязки настолько хороши и имеют настолько низкое эквивалентное последовательное сопротивление, что «звон» теперь не проблема. Я не верю подобным утверждениям. А вы что думаете по этому поводу?

4.4. Эквивалентное последовательное сопротивление

Отдельные изготовители конденсаторов заявляют, в частности, что у их продукции эквивалентное последовательное сопротивление R_s настолько мало, что при его использовании проблем со «звоном» не возникнет. Однако мне кажется, что малая величина R_s только обостряет эту проблему. Я слышал, что один из изготовителей конденсаторов продвигает на рынок керамические конденсаторы с эквивалентным R_s , ограниченным снизу пределом в несколько ом, которые должны способствовать подавлению звона любого типа. Я собираюсь обязательно на них посмотреть и опробовать. Но если вы используете в цепях развязки конденсаторы с очень низким эквивалентным последовательным сопротивлением R_s , то можно понизить добротность Q резонансного контура, который образуется из этих конденсаторов, при подключении с отдельными из них резисторов сопротивлением 2,7–4,7 Ом. Установка резисторов последовательно с развязывающими конденсаторами кажется несколько странным решением, однако это очень эффективный прием.

Керамическим конденсаторам группы «большой ТКЕ» также может быть присущ пьезоэлектрический эффект: если подать на такой конденсатор переменный ток соответствующей мощности, то он начнет явственно «жужжать». Если постучать по такому конденсатору или просто потрясти его, то это может вызвать внезапное изменение заряда конденсатора или напряжения на его выводах. Для конденсаторов других типов такое также возможно, но у конденсаторов группы «большой ТКЕ» данный эффект проявляется сильнее всего. Соблюдайте осторожность при использовании этих конденсаторов в устройствах, предназначенных для работы в условиях сильной вибрации.

Емкость конденсаторов группы «стабильный ТКЕ», таких как X7R, которую они имеют в нормальных условиях, обычно уменьшается не более чем на 15% при изменении температуры в диапазоне $-55...+125$ °C. Эти конденсаторы общего применения очень популярны и обычно производятся с номиналами от 100 до 10 000 пФ. Выпускаются также модели емкостью до 300 000 пФ в более крупных корпусах. Однако можно встретить конденсаторы емкостью 10 000 пФ как с «большим ТКЕ», так и со «стабильным ТКЕ», и обычно невозможно определить, к какой группе относится деталь, не проверив по справочнику код изделия. Или же надо измерить емкость конденсатора, нагревая и охлаждая его.

Последний тип керамических конденсаторов изначально назывался NP0 (аббревиатура от Negative-Positive-Zero – отрицательный-положительный-ноль), а сейчас C0G. Все называют его C0G (си-оу-джи), но на самом деле это должно читаться, как «си-зеро-джи». Я видел документ Ассоциации электронной промышленности [2]. В конденсаторах типа C0G/NP0 используется высококачественный диэлектрик с малой температурной нестабильностью, причем гарантируется, что температурный коэффициент не превысит ± 30 млн⁻¹/°C. Тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая абсорбция и долговременная стабильность параметров этих конденсаторов уступают соответствующим параметрам фторопластовых конденсаторов, но сравнимы с характеристиками других высококачественных прецизионных пленочных конденсаторов. А температурный коэффициент емкости

превосходит этот параметр любых других типов и моделей конденсаторов, которые можно купить. Таким образом, если нужно сделать устройство выборки-хранения, которое можно было бы эксплуатировать в диапазоне температур, предусмотримом для военной техники, то наиболее подходящими считаются конденсаторы группы C0G, которые компактнее и дешевле фторопластовых. Многие, хотя и не все из выпускаемых в настоящее время керамических конденсаторов емкостью менее 100 пФ, соответствуют группе C0G. Если вы готовы платить, то можно найти конденсаторы группы C0G емкостью 22 000 пФ в квадратном корпусе с длиной стороны 8 мм.

Почти каждый год мне звонит какой-нибудь клиент и просит помочь с проблемой дрейфа: у преобразователя частоты в напряжение получилась недостаточная температурная стабильность, даже несмотря на то, что в качестве основного времязадающего элемента используется конденсатор группы C0G емкостью 0,01 мкФ.

Ремонт по телефону – это всегда интересная и захватывающая задача. Я спрашиваю клиента: «Этот керамический конденсатор группы C0G емкостью 0,01 мкФ такого же размера, как ноготь на мизинце?» Клиент говорит: «О нет, он гораздо меньше». Я отвечаю: «Ну, этот конденсатор слишком мал, он не может относиться к группе C0G». Проблема решена. По правде говоря, серийно выпускается некоторое количество малогабаритных конденсаторов группы C0G емкостью 0,01 мкФ, но они встречаются очень редко и их нужно специально заказывать.

Отметим один из видов отказа керамических конденсаторов, который может возникнуть в случае, если выводы крепятся к металлизации на диэлектрическом корпусе с помощью обычного низкотемпературного припоя. При проходе конденсатора через машину для пайки «волной» вывод от такого конденсатора может попросту отвалиться. Если подобное произойдет, то придется перейти на конденсаторы тех типов, при производстве которых используются высокотемпературные припой.

4.5. Серебряно-слюдавые конденсаторы

У конденсаторов, сделанных из посеребренной слюды, большинство характеристик сходны с характеристиками керамических конденсаторов группы C0G. Они обладают небольшим эквивалентным последовательным сопротивлением, значение температурного коэффициента емкости варьируется от 0 до $+100 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. Если при производстве этих конденсаторов используются высокотемпературные припой, то они могут работать и при температурах выше 200°C . К сожалению, у них плохие характеристики по «натеканию» – неожиданно плохие показатели диэлектрической абсорбции.

Основная проблема, которая возникает при использовании конденсаторов из посеребренной слюды, – неразбериха с маркировкой. В старых радиоприемниках для конденсаторов такого вида применялась абсолютно непостижимая маркировка – шесть цветных точек. Но и на отдельных современных образцах применяется очень странный код, поэтому никогда нельзя быть точно уверенным, что именно обозначает надпись «10C00» – 10, 100 или 1000 пФ. В этом случае наверняка

придется пользоваться каким-нибудь прибором для измерения емкости. В прошлом аналогичная путаница существовала с некоторыми керамическими конденсаторами. Мне запомнились два небольших конденсатора, на которых была одинаковая надпись – «15К». Один из них оказался конденсатором емкостью 15 пФ группы ТКЕ «К», а другой имел емкость 15 000 пФ, и оба они были одного размера и цвета.

Также необходимо отметить, что раньше можно было купить вполне качественный конденсатор, емкость которого никогда и никто не контролировал. Приблизительно в 99% случаев это были отличные надежные конденсаторы. Но время от времени попадались отдельные экземпляры, емкость которых резко отличалась от того, что было указано в маркировке.

Однажды я видел целую коробку «конденсаторов», у которых оба вывода все еще представляли собой неразрезанную проволочную петлю (см. рис. 4.3). Не вызывает сомнения, что производитель этих конденсаторов не был заинтересован в выходном контроле и проверке их емкости перед поставкой заказчику! Поэтому, покупая конденсаторы с допустимым уровнем качества (AQL – Acceptance quality level) 1%, а не 0,1 или 0,01%, всегда учитывайте, что некоторые дешевые детали не проверяют даже выборочно.

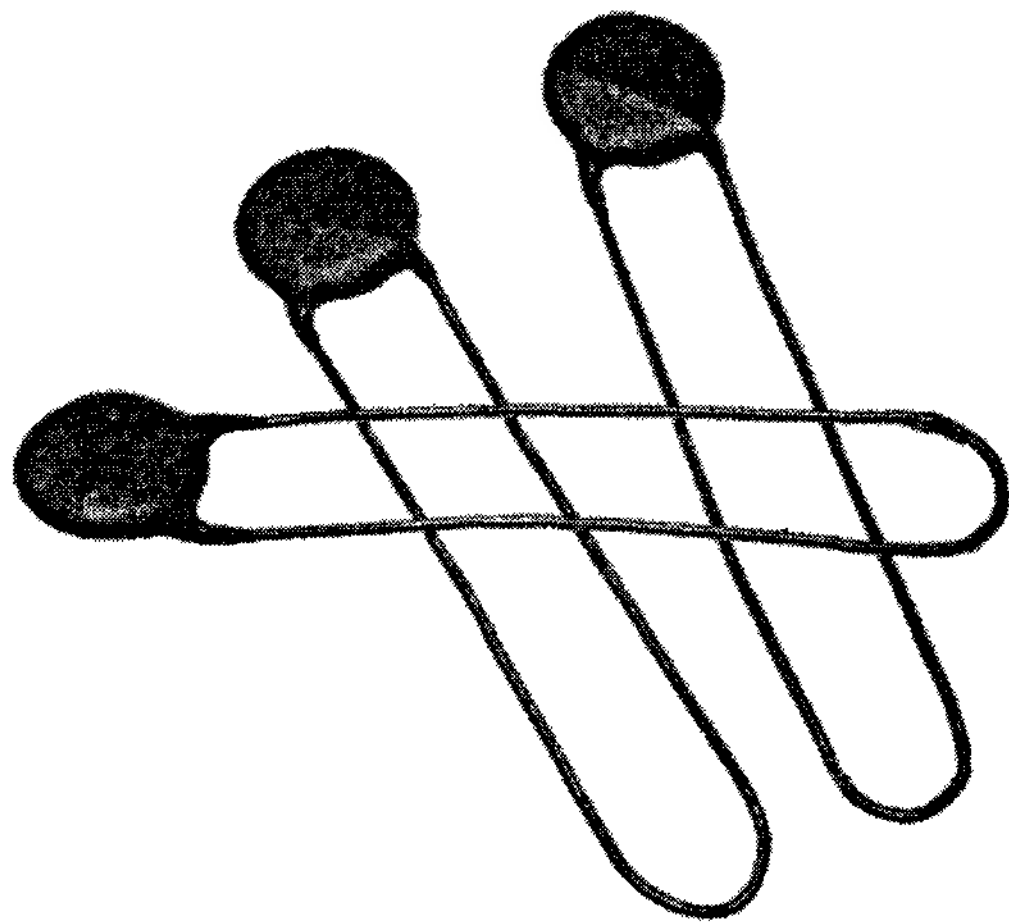


Рис. 4.3. Загадка для разработчика

Можете быть уверены, что производитель не проверял эти конденсаторы перед отгрузкой. Или я не прав?

4.6. Переменные конденсаторы

Переменные конденсаторы обычно изготавливаются из материалов, параметры которых мало зависят от температуры. Такие конденсаторы имеют характеристики, сходные с характеристиками конденсаторов группы C0G. Их электрические параметры просто замечательные. Диэлектрик не вызывает особого беспокойства, однако металлические скользящие контакты или электроды на некоторых моделях очень тонкие, и после небольшого числа оборотов – нескольких сотен или даже десятков – металл может стереться и контакт с обкладками нарушится.

Вообще говоря, конденсаторы – это очень надежные элементы, и если не пытаться «поджаривать» их на тепловых перегрузках или безжалостно «крушить», то все малосигнальные конденсаторы будут служить вечно, а электролитические проработают очень долго. (Устаревшие маслonaполненные или «с масляной пропиткой» конденсаторы не настолько надежны и, вероятно, уже везде заменены или, по крайней мере, должны быть заменены.) Единственная причина, по

которой конденсатор может оказаться ненадежным, – несоответствие его типа назначению. И все же необходимость поиска неисправностей может возникнуть. Если знать, чем конденсаторы одного типа отличаются от конденсаторов другого, то легче выбрать правильное направление.

4.7. Методы добавления или замены типа

Как же лучше всего искать неисправности, связанные с конденсаторами? Я использую два основных способа, первый – метод добавления. В большинстве случаев точное соответствие емкости установленных конденсаторов заданному значению не критично для работы схемы, если емкости их достаточно велики. Итак, если есть конденсатор емкостью 0,01 мкФ, который, по моему предположению, не работает, я просто параллельно ему добавляю еще один такой же. Если пульсации изменяются вдвое или проявляется другой эффект от воздействия на схему этого конденсатора, значит, проверяемый конденсатор, по-видимому, работает исправно, а проблема в чем-то другом. Но если изменений не произошло, они почти незаметны либо все изменилось в три, пять или даже десять раз, то я предполагаю, что емкость проверяемого конденсатора не та, что должна быть. ВОТ ТОГДА выпаиваю конденсатор и измеряю его емкость. Здесь, безусловно, могут пригодиться магазины емкостей, о которых я рассказывал в той части главы 2, которая посвящена измерительному оборудованию, – используя их, можно «поиграть» с разными номиналами. Однако в чувствительных схемах длинные провода, с помощью которых подключаются магазины емкостей, могут вызвать перекрестные или внешние наводки или самовозбуждение. Таким образом, мне, возможно, придется «приложить» дискретный конденсатор непосредственно к контактам на плате.

Предположим, к примеру, что в схеме установлен разделительный конденсатор, и создается впечатление, что он добавляет «длинный хвост» к импульсной характеристике этой схемы. Я не настаиваю на том, что схема, в которой используется пленочный конденсатор, должна работать идеально, но наличие такого «хвоста» просто никуда не годится!

Замечание: проблему появления «длинного хвоста» в момент, когда напряжение на конденсаторе должно установиться, можно выразить и по-другому: у этого конденсатора плохой уровень диэлектрической абсорбции или большое «натекание». Это одно и то же явление, названное по-разному.

После этого я выпаиваю один из контактов пленочного конденсатора и устанавливаю полипропиленовый конденсатор такой же емкости. По моим ожиданиям характеристики нового конденсатора должны быть много лучше, чем старого. Если «хвост» уменьшится, то либо моя идея использовать конденсатор из полиэтилен-терефталатной пленки оказалась не очень удачной, либо конденсатор хуже, чем обычно. Теперь можно проверять конденсатор. Однако схема с полипропиленовым конденсатором *работает не намного лучше*, чем с обычным пленочным. Из этого я делаю вывод, что проблема не в конденсаторе.

Вне зависимости от того, какой методикой пользоваться, полезно иметь большой запас отобранных конденсаторов. У себя в лаборатории мы храним несколько картонных коробок уже бывших в употреблении, но не слишком потрепанных

деталей, оставшихся от предыдущих экспериментов. В одной из этих коробок сложены небольшие керамические и слюдяные конденсаторы, в другой – разнообразные электролитические конденсаторы, а еще в одной ждут своего часа отсортированные пленочные конденсаторы. Эти коробки очень удобны в работе: если мне понадобится деталь необычного типа и емкости, я могу порыться в одной из них и «выловить» что-нибудь подходящее. Или же мне удастся найти несколько конденсаторов, параллельно соединив которые, я получу требуемую емкость. Я использую эти конденсаторы как для метода добавления, так и для метода замены. В дополнение к конденсаторам в общих коробках я держу несколько фторопластовых конденсаторов в собственном шкафу на тот случай, когда понадобится действительно высококачественная деталь.

Наиболее любим мною метод, о котором никто никогда не говорит (но он стар, как горы). Если необходимо сравнить, как в небольшой прецизионной схеме работают полиэтилентерефталатный и керамический конденсаторы, то что надо делать? Выпаивать пленочный конденсатор для того, чтобы заменить его керамическим. А вот и неверно! Вместо этого нужно отпаять одну ножку первого конденсатора и слегка приподнять ее над платой, а затем припаять один из выводов второго конденсатора в освободившееся отверстие. В таком положении ни один из конденсаторов на самом деле в цепь не включен – оба склонились над платой, как ивы над рекой.

После того как припой хорошенько остынет, можно, используя определенную упругость выводов конденсаторов, кратковременно «прикладывать» к схеме один или другой конденсатор (менять тип) либо оба сразу. Для выбора нужного требуется всего секунда. (Эти фокусы удаются, если в цепи нет напряжения, которое могло бы «укусить» меня за палец. Если же оно есть, то я прижимаю контакты палочкой от эскимо или же, что более научно, куском стеклотекстолита...) Выпаявая конденсаторы, затем запаивая их и ожидая, пока остынут эти термозависимые элементы, можно попросту забыть, какая разница была в работе схемы с каждым из них. Таким образом, предложенный метод не только позволяет сэкономить кучу времени, но и в значительной степени облегчает сравнение одного варианта с другим – можно визуально оценить все нюансы самых незначительных изменений в работе схемы.

Конечно, если на макете одновременно применяются два или три подобных «пружинных» элемента и они начинают шататься, то это означает, что пришло время припаять на место те из них, которые уже не используются в экспериментах. В общем, данная технология весьма ценна, но я ни разу не встречал упоминаний о ней в литературе. Так что мои наилучшие пожелания всем, кто будет использовать этот метод. Аналогично можно работать и с диодами, резисторами и даже с транзисторами. Только проверьте, не препятствуют ли остатки флюса контакту со схемой «подпружиненного» вывода детали. А также убедитесь, что ваши пальцы не вносят в схему дополнительную емкостную и резистивную составляющие и не способствуют появлению дополнительных шумов или наводок. Если наблюдаются подобные проблемы, то попробуйте давить на элемент ногтем, а не пальцем, паразитная емкость при этом должна увеличиться примерно на 0,5 пФ.

4.8. Как искать неисправности

После того как я дал почитать черновик этой главы своим друзьям, один из них спросил: «Что ты все рассказываешь об этих непонятных конденсаторах? Разве они имеют отношение к поиску неисправностей?» Я ответил ему так же, как говорю вам: если бы вы использовали разделительный конденсатор сомнительного качества и не знали, что он может продолжать «течь» на много секунд или минут дольше, чем высококачественный разделительный конденсатор, то не пытались бы разобраться с проблемами, которые мог бы вызвать этот конденсатор. Нельзя предвидеть все сложности, которые возникнут с конкретными схемами, но хочу сказать, что почти одинаковые на вид радиодетали могут обладать совершенно различными характеристиками. Вы не сможете узнать об этих характеристиках, читая книги или изучая справочные листки и технические условия. Но я пытаюсь определить основные направления действий, чтобы выяснить, в чем причина неисправности, и устранить ее. А если вы будете соблюдать предлагаемые здесь меры предосторожности и думать о последствиях ваших действий, то вам, вероятно, удастся избежать проблем в дальнейшем.

Надеюсь, то, о чем я вас здесь предупреждал, сможет объяснить причину возникновения проблемы. Время от времени мне удастся разобраться в чем-то из того, что ранее было непреодолимым препятствием на моем пути, – вот объяснение тому, почему генератор, который я собрал два года назад, так и не заработал.

Я абсолютно не претендую на авторство всех предлагаемых здесь идей и привожу множество достижений, которые являются плодами чужого труда. Более того, я сомневаюсь, что те, у кого я их позаимствовал, додумались до всего сами. Я просто пытаюсь рассказать вам об отдельных нюансах, которых нет в учебниках.

Литература

1. Pease, R. A., “Understand capacitor soakage to optimize analog systems”, *EDN*, October 13, 1982, с. 125.
2. EIA Documents RS-198, с. 11.

5. ДЕТАЛИ И МОНТАЖ: ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ, РАЗЪЕМЫ, РЕЛЕ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

На качество работы схемы, помимо выбранной элементной базы, оказывают влияние материалы, используемые в конструкции. Эта глава посвящена тому, что необходимо знать для решения периодически возникающих проблем с печатными платами, припоем, разъемами, проводами и кабелями. Здесь рассмотрены также особенности разводки печатных плат: неудачно выполненная разводка – причина не только случайных сбоев, но и надежности работы схемы в целом.

Возможно, кое-что из того, что вы уже прочли, показалось вам очевидным. Но очень часто именно «очевидные» вещи инженеры упускают из виду. А здесь приведена как раз та информация, которая может в значительной степени облегчить поиск неисправностей. Так что будьте внимательны и не пренебрегайте общеизвестными правилами. Не стоит считать маловажными факторами тип материала, из которого изготовлена печатная плата, ее топологию, провода (все должны быть одинаковыми). При неправильном отношении к платам, разъемам, проводам и кабелям они могут подвести в самый неожиданный момент.

Прежде всего отметим, что использование термина «печатная плата» некорректно, так как в настоящее время практически все платы изготавливают методом травления. Но, несмотря на это, я и далее буду использовать термин «печатная плата», так как он широко распространен и привычен.

Проблемы с печатными платами:

- некачественный материал платы;
- настолько низкое качество платы, что есть замыкания и обрывы дорожек или, что еще хуже, «блуждающий» контакт в сквозных металлизированных отверстиях;
- отслаивается фольга от платы вследствие неправильного обращения с ней;
- маска для паяния не нанесена из-за экономии – на плате появились замыкания от излишков припоя;
- поверхность платы проводит ток или загрязнена;

- топология платы неудачна: повсюду наблюдается «просачивание», перекрестные наводки сигналов, возможна также интерференция между линиями передачи (со строго определенным волновым сопротивлением), приводящая к появлению отражений и «звонов».

5.1. Проблемы с печатными платами

Методы решения проблем с печатными платами, а также способы, позволяющие полностью их исключить, довольно просты.

В настоящее время стеклотекстолит для печатных плат марок G10 и G11 имеет очень высокое качество и разумную цену. В большинстве случаев попытки использовать более дешевые слоистые пластики (в Америке их презрительно называют «fishplate» – чешуя), например гетинакс, оказываются нерентабельными. Более того, применение дорогих специальных высокотемпературных или других экзотических материалов может оказаться оправданным, а в некоторых случаях может даже понадобится гибкая печатная плата. Если нет возможности проконсультироваться с экспертом по материалам для печатных плат, то полезный совет обычно можно получить прямо от изготовителей печатных плат или производителей материалов для них.

В табл. 5.1 приведены сравнительные характеристики различных материалов, используемых при производстве печатных плат.

В некоторых высокочастотных устройствах слоистые материалы подходят лучше, чем стеклотекстолиты: у них меньше диэлектрическая проницаемость и превосходная стабильность размеров. Так, для выносных пробников сверхширокополосных осциллографов некоторые виды стекловолокнистых материалов определенно не подходят, так как обладают посредственной диэлектрической абсорбцией, особенно если эпоксидное связующее не было соответствующим образом обработано.

Несколько слов о качестве. Практически невозможно найти причин, оправдывающих приобретение плат у изготовителя, качество продукции которого заранее не известно. Низкая цена – первый из самых малоубедительных аргументов, а второй – невозможность добиться от постоянного поставщика приемлемых сроков поставки. Как-то раз для того, чтобы выполнить срочный контракт, нам пришлось собирать изделия на платах, изготовленных на оборудовании нашей лаборатории. Проблем при использовании таких плат для опытных образцов никогда не было, поэтому я удивился, когда пришлось разбираться с неисправностями и обнаружилось, что на качественной плате возникло замыкание между двумя дорожками.

Внимательное изучение поверхности платы с лупой позволило заметить тоненькое замыкание шириной 0,08 мм, образовавшееся в результате того, что на фотошаблон упал волос. Наверное, никто не стал бы пытаться пропустить по имеющей такую ширину дорожке фольги ток 20 мА, но в данном случае для выжигания вызвавшей замыкание тоненькой перемычки понадобилось пропустить через нее ток 200 мА. Подобным же образом мы нашли и три разрыва толщиной в волос. В земляной шине были разрывы в двух или трех местах – едва заметные невооруженным глазом тонкие канавки шириной 0,1 мм. Эти разрывы образовались

Таблица 5.1. Характеристики слоистых материалов для печатных плат

Тип	Изготовитель	Диэлектрическая проницаемость (на частоте 1 МГц)	Тангенс угла потерь (на частоте 1 МГц)	Объемное удельное сопротивление (МОм-см)	Поверхностное удельное сопротивление (МОм)	Максимальная рабочая температура (°C)	Примечания
XXRPC	Generic	4,1	0,032	5×10 ⁶	5×10 ⁴	+125	Небольшая цена, фенольные смолы и бумажная основа, плохая механическая прочность
CEM-1	Generic	4,5	0,025	1×10 ⁸	5×10 ⁷	+130	Стандартный, экономичный
CEM-3	Generic	4,7	0,020	1×10 ⁸	5×10 ⁷	+130	То же, что CEM-1, но можно использовать высечку
G-10	Generic	4,75	0,023	5×10 ⁸	4×10 ⁸	+130	Сравним с CEM-3
F4486	Oak	3,5	0,02	1×10 ⁹	3×10 ⁶	N/A	Гибкий
FR-4	Generic	4,9	0,018	1×10 ⁸	5×10 ⁷	+130	То же, что CEM-1, но пожаробезопасен
GT-522	Keene	2,5	0,0010	1×10 ⁷	1×10 ⁷	+260	по стандарту UL-94-V-0
GX-527	Keene	2,5	0,0019 (при частоте 10 ГГц)	1×10 ⁷	1×10 ⁷	+260	Фторопласт, хорошо подходит для высоких температур и частот
NI-3003	Technopoly	4,5	0,020	3×10 ⁷	5×10 ⁶	+250 (10 000 часов)	Предназначен для высоких частот
3003-quartz	Technopoly	3,6	0,004	5×10 ⁹	8×10 ⁷	+250 (10 000 часов)	Полиамидный
							Сравним с CEM-3

Примечание. От изготовителя печатная плата, как правило, поступает очень чистой и имеет высокое сопротивление. Иногда на плате сразу наблюдаются утечки, но обычно они не появляются до тех пор, пока ее не пропаяют или не помогут загрязненным растворителем, – это пятая проблема.

при изготовлении негатива и, естественно, в результате отпечатка волоса. После нескольких часов битвы – разрывая замыкания и замыкая разрывы – мы дали клятву никогда больше не связываться со столь низкокачественными изделиями.

Что касается третьей проблемы, то не позволяйте неумелым инженерам или техникам портить хорошие платы чересчур активным или безграмотным применением паяльника. Такое обращение с платой наверняка приведет к отслоению фольги. Используйте достаточно горячий паяльник, чтобы пайка шла в режиме точечного касания (приложил – убрал). Когда паяльник недостаточно горяч и для пайки требуется больше времени, то вот тут-то фольга и начинает отслаиваться...

Маска для нанесения припоя, являющаяся причиной четвертой неприятности, почти всегда, как многие убедились, стоит затраченных на нее денег. Без этой маски поразительное свойство припоя соединять металлы между собой, которое можно назвать божественным, становится дьявольским.

5.2. Поиск утечек

Если перед вами плата, разъем или изолятор с утечками, на которых сопротивление едва не доходит до бесконечности, то как на них измерить утечку? Использовать для этого обычный цифровой вольтметр нельзя, так как даже при установке максимального верхнего предела измерения сопротивления (к примеру, 20 МОм) на дисплее будет высвечиваться Перегрузка (Overrange). Не удастся попытка произвести измерения, установив предел 2000, 20 000 или 200 000 МОм или более. У некоторых цифровых вольтметров или цифровых мультиметров есть шкала в микросименсах (для измерения проводимости), по которой можно определить сопротивление с точностью до 100 МОм. Но эта шкала обычно не имеет более высокого разрешения.

Существует два основных способа измерения тока утечки. Метод, которым я пользовался много лет, заключается в том, чтобы подключить пару транзисторов в качестве широкодиапазонного логарифмического преобразователя ток-напряжение в цепь обратной связи операционного усилителя с очень малыми входными токами. Сейчас я уже не использую электронные лампы – научился работать с операционным усилителем LMC660 (см. схему, показанную на рис. 5.1).

Я откалибровал этот приборчик так, чтобы по самодельной шкале на микроамперметре измерять токи в пределах +1 пА...+1 мА и –1 пА...–1 мА (рис. 5.2).

Пока в нашей лаборатории работает система кондиционирования (температура в помещении неизменна), я могу быть уверен, что проведенная калибровка не «уползет» более чем на 10 или 20%, и этого вполне достаточно для того, чтобы я определил, какой порядок имеет измеряемый ток (V_{BE} в определенной степени зависит от температуры, но не настолько, чтобы внести в схему существенные погрешности). В силу того, что транзисторы являются нелинейными элементами, то для использования их в качестве датчиков преобразователя ток-напряжение точку суммирования схемы придется надежно защитить от шумов и помех, наводимых переменными электромагнитными полями (50 Гц, 100 Гц, 1 МГц и т.д.). Это позволит предотвратить выпрямление переменных составляющих этих шумов,

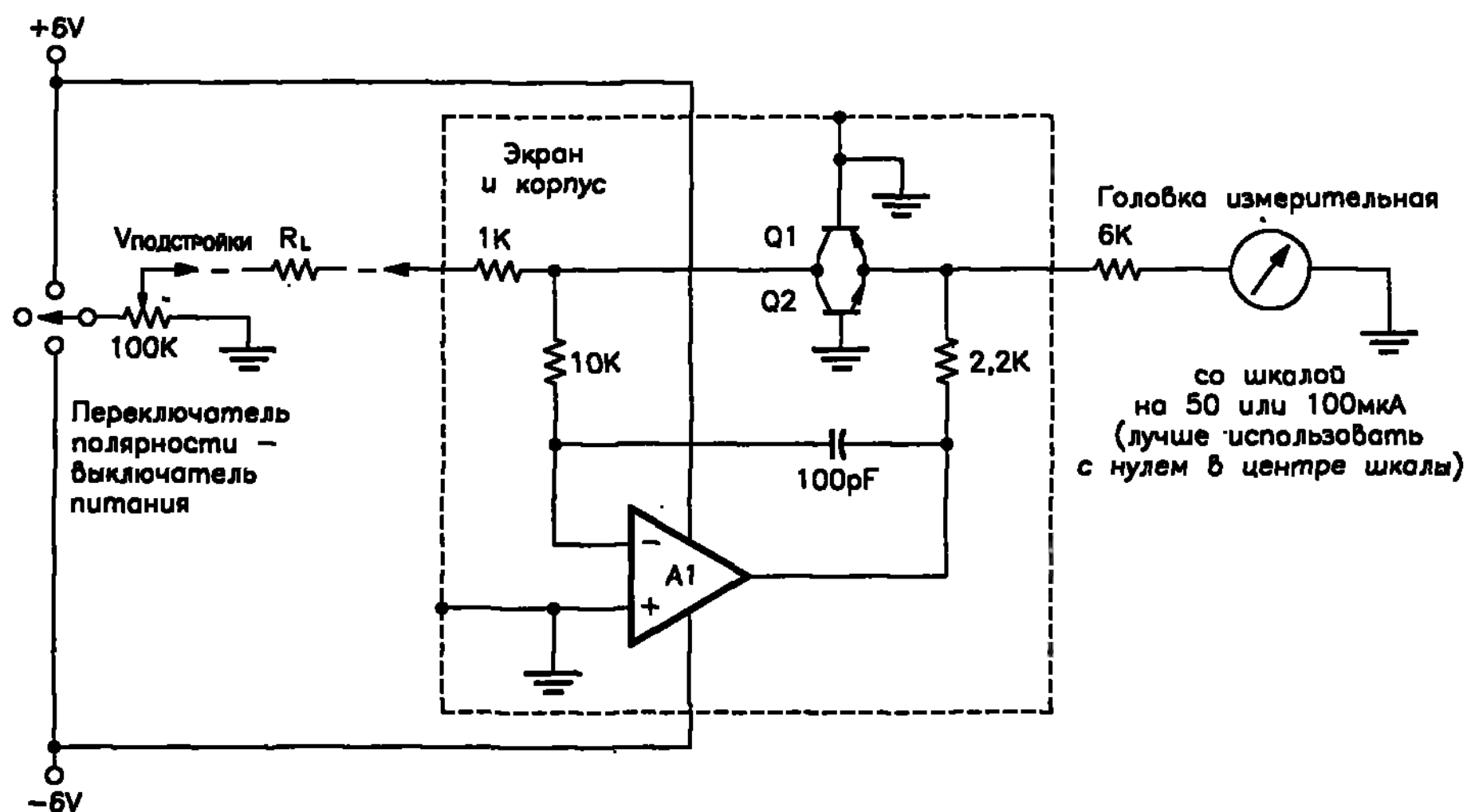


Рис. 5.1. Пробник для оценки утечек

Схема для проверки печатных плат на токи утечки. Транзисторы включены параллельно в цепи обратной связи операционного усилителя так, что они выполняют функцию логарифмического преобразователя ток-напряжение с большим динамическим диапазоном и логарифмической передаточной характеристикой.

Примечание к рис. A1 – 1/4 LMC660N или 1/2 LMC662N, Q1 – 2N4250 (или подобный транзистор), Q2 – 2N930 (или подобный транзистор).

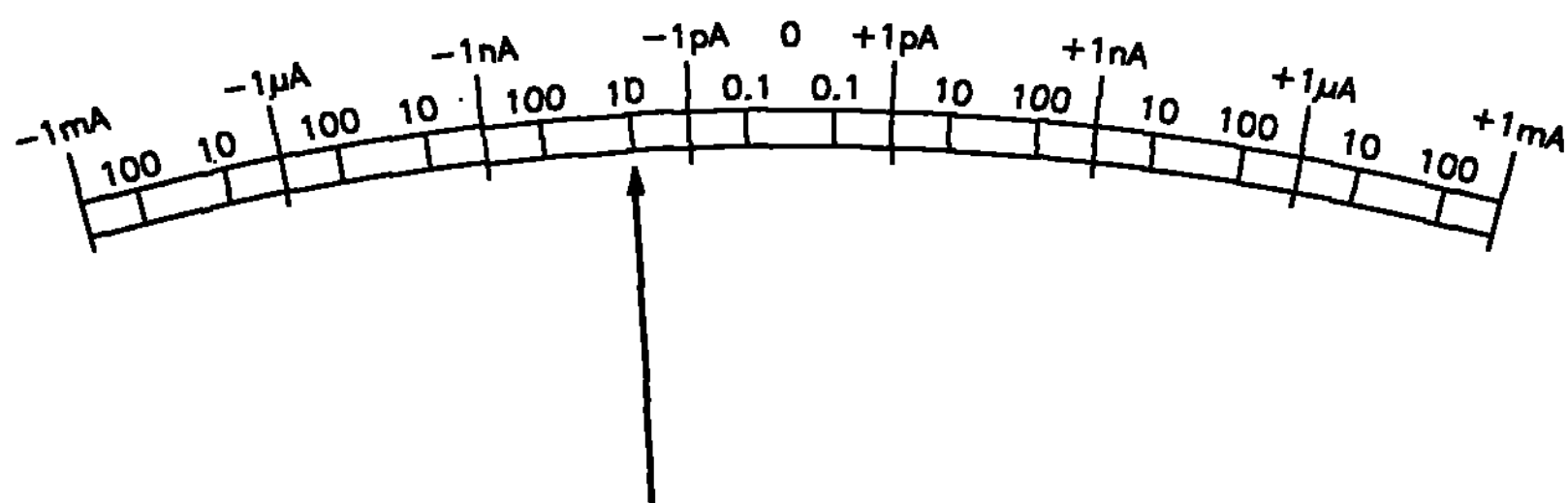


Рис. 5.2. Пример шкалы для пробника на рис. 5.1

Можно откалибровать логарифмический измеритель тока в схеме так, чтобы измерять токи в пределах $-1 \text{ мА} \dots -1 \text{ пА}$ и $+1 \text{ пА} \dots +1 \text{ мА}$.

приводящее к ошибочным результатам. Поэтому всю измерительную схему с измеряемым высокоомным сопротивлением лучше поместить в металлический ящик, причем хорошо заземленный. Дополнительно его можно накрыть крышкой.

Необходимо отметить, что метод с использованием цифрового вольтметра несколько более точен и, вероятно, обеспечивает более высокое разрешение (см. рис. 5.3), но при этом внешние шумы и наводки могут значительно повлиять на результаты измерения.

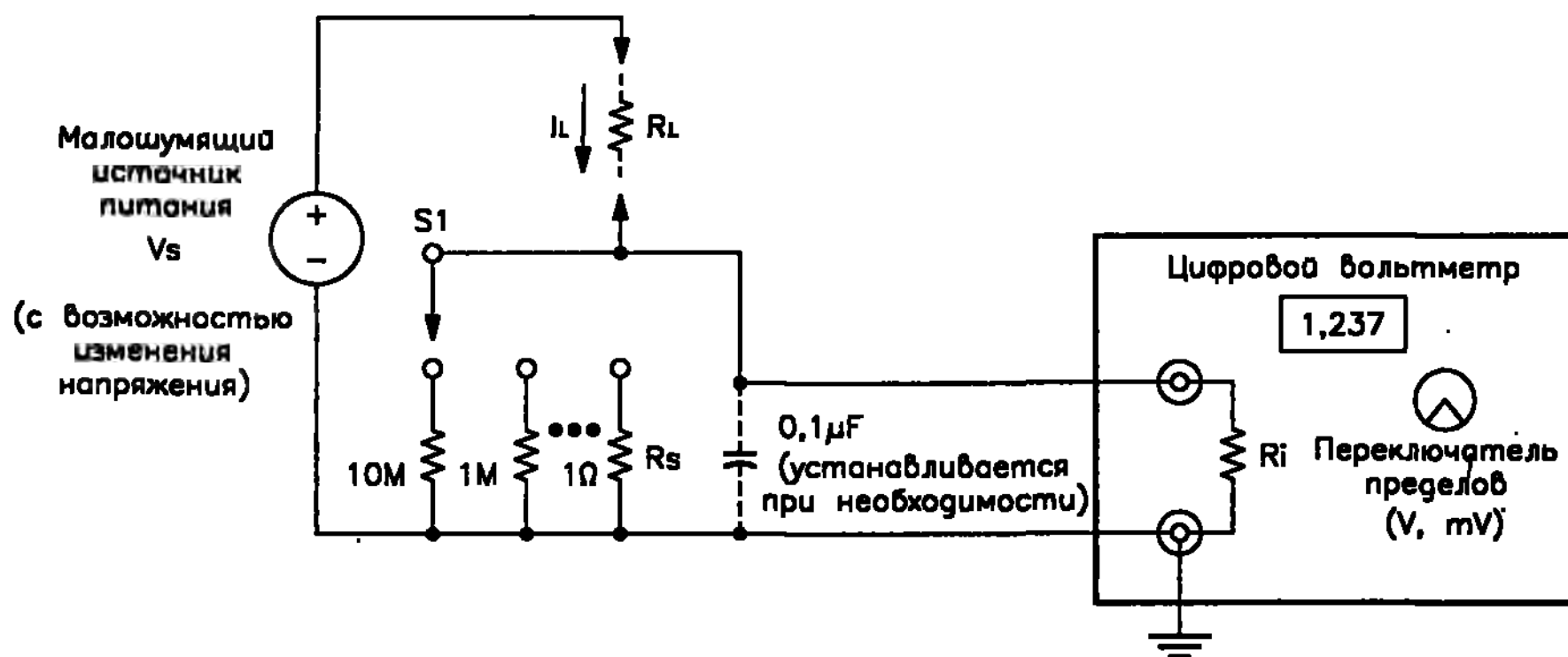


Рис. 5.3. Поиск утечек с помощью вольтметра

Использование цифрового вольтметра для определения тока утечки – альтернатива специальной схеме (рис. 5.1). Ток утечки можно посчитать по закону Ома: $V_s = I_s \times R_s$ или $I_s = V_s / R_s$.

Примечание к рис. S_1 – переключатель измерительных резисторов; R_i – входное сопротивление цифрового вольтметра. У некоторых вольтметров R_i равно 10 МОм , у других оно изменяется при переключении пределов (нужно изучить руководство по применению).

Кроме того, определить тенденции изменения измеряемых параметров с помощью цифрового вольтметра будет непросто. При этом, если необходимо измерять токи в широких пределах, то придется подключать к схеме резисторы с различным сопротивлением или же ждать, пока в цифровом вольтметре отработает система автоматического переключения пределов, а как я уже упоминал, работа автомата пределов совершенно не соответствует моим представлениям о счастье. С другой стороны, цифровой вольтметр есть практически везде, вот почему этот метод всегда доступен.

В любом случае, если вы подадите напряжение 15 В на резистор, имеющий сопротивление $1\,000\,000\text{ МОм}$, и в результате измерения получите ток 15 пА , то точность такого измерения как минимум в $50\,000$ раз превзойдет точность большей части измерительных приборов, которые к тому же могут измерять сопротивление только до 20 МОм . Вне зависимости от того, какой измерительный прибор вы используете, нужно подать подходящее напряжение на неизвестное сопротивление, после чего посмотреть, в каком именно месте утечка достигает величины, заслуживающей внимания. Этот метод можно использовать также для испытания переходов диодов и транзисторов. Схема с операционным усилителем не может быть рекомендована для измерения утечек в конденсаторах большой емкости; впрочем, и метод с использованием цифрового вольтметра тоже малопригоден, так как конденсаторы большой емкости заряжаются медленно, а также возникает эффект натекания или диэлектрической абсорбции. Однако если рискнуть и начать измерения с малой величины сопротивления $R_{\text{сence}}$, то, возможно, удастся получить более или менее близкие к истине результаты измерений.

Недавно у одного из наших клиентов возникли проблемы с простейшей элементарной схемой, в которой использовался интегральный стабилизатор LM317, а все резисторы в схеме были низкоомными (см. рис. 14.3). Всего через несколько минут работы выходное напряжение на LM317 начинало сильно «плавать».

Выяснилось, что причина *не* в стабилизаторе LM317, *не* в резисторах и *не* в конденсаторах, а в остатках флюса в тех местах, которые совсем не промыли после пайки. В данном случае сопротивление пережженного флюса составило всего 500 Ом при измерении участка печатной платы размером $2,5 \times 25$ мм². Образовалась сильная утечка с шины $+V_{in}$ на выход стабилизатора, которая полностью свела на нет стабилизацию выходного напряжения! Таким образом, даже если нет необходимости получить сопротивление утечек по плате порядка 10^{12} Ом, следует тщательно следовать элементарным правилам соблюдения чистоты, в противном случае и самые простые из сделанных вами схем никогда не будут работать как нужно.

Аналогичным образом одна из созданных нами быстродействующих плат для схемы выборки и хранения имела сопротивление утечки порядка 10^{11} Ом, что нас совершенно не устраивало. Мы попробовали отмыть плату всеми имевшимися в распоряжении органическими растворителями, но успеха не добились. В конце концов я взял несколько плат домой и загрузил их в посудомоечную машину, засыпав обычную дозу «Калгонита»¹. После полного цикла мытья и полоскания я вынул платы, хорошо потряс их, чтобы удалить большую часть капель воды, и высушил их в духовке при температуре 80 °С. На следующий день измерения утечки дали более приемлемый результат, составивший 10^{13} Ом. Я несколько раз использовал данную технологию для очистки «текущих» печатных плат и разъемов, и она всегда срабатывала на удивление здорово. Этот метод может быть эффективен даже в тех случаях, когда спирт, различные хлорэтаны и другие органические растворители оказываются абсолютно бесполезными.

После того как плата станет чистой и сухой, вам захочется, чтобы она всегда такой и оставалась. Для этих целей вы можете воспользоваться уретановыми, акриловыми и различными видами эпоксидных защитных покрытий. Наносят такие покрытия либо методом погружения платы целиком, либо методом распыления из аэрозолей. Лидирующее положение в этой области занимает фирма Humiseal², которая предлагает широкий выбор различных видов продукции различного назначения. Ребята из Essex Junction рассказали мне о нескольких видах лаков, выпускаемых фирмой John Armitage Co.³, которые образуют довольно толстое покрытие с очень большим сопротивлением. После нанесения лака требуется некоторое время для просушки, после чего образуется весьма стойкий слой, и мне это нравится. Когда я разрабатывал и собирал несколько небольших модулей весом в 1/3 унции (около 9 г), которые ученые собирались поднять на вершину Эвереста, то для сохранения их в сухом и чистом виде решил обильно покрыть двумя слоями лака Armitage. Это покрытие гораздо легче того, что получается после заливки платы эпоксидным компаундом, что очень важно, если кому-то придется на собственной спине тащить оборудование на высоту 29 000 футов (около 8 700 м).

После нанесения какого-либо из перечисленных защитных покрытий добираться до деталей или поверхности платы для ремонта схемы или замены элементов

¹ Порошок для посудомоечных машин. – Прим. переводчика.

² Humiseal Div. of Chase Corp, 26-60 Brooklyn-Queens Expressway, Woodside, NY 11377. (718) 9320800.

³ Armitage MM-00941 Clear Brushing Alkyd Varnish; John Armitage & Company, 1259 Route 46, Parsippany, NJ 07054. (201) 402-9000.

будет весьма непросто. Так что, выбирая степень стойкости покрытия, умерьте свой пыл, задумавшись о том, насколько тяжело будет удалять защитный слой при выполнении ремонтных работ.

Когда я работал в компании Philbrick, мы наносили защитное покрытие на большую часть продукции фирмы методом погружения в эпоксидный компаунд, что обеспечивало высокую надежность и безопасность. Если ваша схема хорошо продумана и собрана, а затем надежно залита компаундом, то у нее есть отличные шансы просуществовать вечно. При этом внутрь схемы не проникнет влага, все будет изотермично, защищено от ударов и механических повреждений. Но в случае повреждения при электрической перегрузке добраться до платы и отремонтировать ее будет практически невозможно. Можно попытаться найти неисправность, для чего придется просверлить защитный слой. Захватывающее занятие, сделав в блоке дырку, заниматься исправлением неполадок на залитой плате. Иногда материал, используемый для заливки, увеличивает механическую нагрузку на элементы: сжатие резисторов и конденсаторов может изменить их номинал, а большое количество эпоксидной смолы вокруг схемы может заметно увеличить паразитные емкости. Если вы защищаете схему методом погружения, не промыв, тщательно не очистив и не просушив печатную плату после монтажа, то внутри залитого модуля может сохраниться влага. Под эпоксидным компаундом может быть скрыто много грехов, но качество исполнения и тщательность проектирования не скрыть ничем. Если под хорошим защитным покрытием – брак, то в результате получится хорошо защищенный брак.

Убедитесь, что разработчики, выполнявшие разводку вашей печатной платы, следовали правилам, гарантирующим надежную работу. К примеру, если ваша схема содержит высокоомный каскад и вы предполагаете, что утечки могут вызвать проблемы, то не стоит разводить такие высокоомные цепи близко к шинам питания – предусмотрите защиту, проложив между двумя цепями дорожку заземления или «охранное кольцо».

Я тысячу раз слышал, как какой-нибудь инженер заявляет: «Удельное сопротивление этого стеклотекстолита составляет 10^{14} Ом×см, вот почему, вероятно, не стоит надеяться, что сопротивление между точкой суммирования и остальным миром составит 10^{12} Ом...» После этого я показываю, что полученная при измерениях величина сопротивления обычно чуть выше, чем приводится в технических условиях, но я считаю, что полагаться на это не стоит. Так что на своих платах я защищаю точку суммирования, окружая тонкой «земляной» дорожкой все критические точки *как на одной, так и на другой* стороне печатной платы.

Если при разработке схемы были предусмотрены такие заземленные «охранные кольца», то схема сможет устойчиво работать даже в условиях максимальной влажности. Судите сами: во внутренний объем изолятора из стеклотекстолита грязь попасть не может, а вот поверхности платы – это как раз те места, где могут легко образоваться утечки из-за загрязнения или повышенной влажности. И именно здесь необходимо предотвращать утечки. Естественно, проблемы перекрестных наводок и паразитных емкостных связей на высокой частоте, вызываемые близким расположением дорожек, решаются защитным экранированием точно таким же образом, что и проблемы утечек. Для того чтобы было легче разрабатывать

грамотную топологию печатной платы, всегда помните о том, к чему могут привести dv/dt и di/dt на плате с неудачной разводкой.

5.3. Размещение деталей на печатных платах

Разводка печатных плат – дело непростое. Но определенные тонкости можно запомнить и в дальнейшем применять ряд топологических и конструктивных приемов, облегчающих проверку, регулировку и приемку разрабатываемой схемы. Опытные разработчики знают множество разных хитростей, но я готов поспорить, что очень немногие записывают их, чтобы поделиться с другими. На мой взгляд, не зафиксированное на бумаге правило всегда нарушается, так что мы стараемся записывать все. Я рекомендую всем разработчикам вести собственный список однажды пригодившихся идей. Вот несколько записей из моего списка, посвященных разводке печатных плат:

- убедитесь, что все сигналы, которые могут понадобиться при поиске неисправностей или проверке, легко найти и удобно подключить щуп к соответствующим точкам. Оставляйте в маске для нанесения припоя небольшие свободные «окошки» для удобства работы и надежности контакта;
- включайте в комплект документации на плату шаблон слоя шелкографии, содержащий рисунки и позиционные обозначения всех элементов. Будет неплохо также обозначить и пронумеровать все контрольные точки и указать правильную полярность диодов и электролитических конденсаторов;
- трассируйте сигнальные цепи так, чтобы при желании, легко можно было бы разрезать дорожку и разорвать цепь, вне зависимости от того, аналоговая это схема или цифровая;
- многие современные печатные платы содержат несколько слоев, имеющих сложную топологию земли, шин питания и сигнальных цепей. Для поиска неисправностей на таких платах необходимо владение специальными приемами и особыми навыками, а чтобы не заблудиться и не запутаться, понадобятся все виды «рисунков» различных слоев платы. Убедитесь, что все узлы платы доступны, открыты, а не «закопаны» во внутренних слоях и не закрыты целиком крупногабаритными элементами;
- по возможности оставляйте достаточно свободного пространства вокруг элементов, особенно тех, выход из строя и замена которых наиболее вероятны. Подобные элементы обычно расположены в частях схемы, размещенных вне платы и подвергающихся воздействиям разрядов статического электричества или ударам молний, в силу чего они могут внезапно отказать;
- размещайте хрупкие, чувствительные и прецизионные детали подальше от краев платы, где они могут быть легко повреждены в результате неаккуратного обращения;
- старайтесь как можно реже использовать монтажные пистоны и пустотелые заклепки для соединения различных слоев фольги на печатной плате.

Много лет назад применение сквозных металлизированных отверстий в плате считалось рискованным делом, поэтому для соединения верхнего и нижнего слоев

фольги мы использовали пустотелые заклепки. Когда такие заклепки проходили термические испытания циклами нагрев-охлаждение, тепловые нагрузки приводили к тому, что в районе отверстий фольга отрывалась от поверхности платы. Недавно мне попались на глаза статьи с рекомендациями использования пустотелых заклепок на печатных платах, и это меня сильно рассердило.

Если вам необходимо использовать пустотелые заклепки, то не стоит рассчитывать на них, как на средство связи между верхним и нижним слоями фольги. В настоящее время сквозные металлизированные отверстия в платах абсолютно надежны, но я все еще предпочитаю при наличии свободного места использовать два таких отверстия параллельно, либо пропускать через такое отверстие вывод элемента. Такое решение позволяет мне чувствовать себя более спокойно. (Более подробно о пустотелых заклепках в платах читайте в главе 13.)

Существенно важным, чем улучшения конструкции схемы, является то, что разводка вашей платы должна быть сделана так, чтобы не снижать, а по возможности повышать ожидаемое качество работы схемы. Я стараюсь разрабатывать топологию так, чтобы дорожки на печатной плате (так же как и металлические проводники на кристалле интегральной схемы) были максимально короткими и компактными. В особенности это относится к высокочувствительным частям схемы, в которых, будь они длиннее, могли бы наводиться более высокие уровни шумов и помех, возникать большая утечка и значительно возрастать паразитные емкости. В противном случае получаются длинные печатные жгуты проводников, напоминающие полную тарелку спагетти. Однако иногда *необходимо* размещать отдельные элементы в не совсем удачных местах. Причины этого могут быть самые разные, к примеру, термодинамические соображения или особенности эргономики изделия, и это ведет к появлению «синдрома спагетти». Но иногда это просто необходимо и становится предметом инженерного решения, серьезных компромиссов, на которые приходится идти. Недавно я пытался создать счетчик на 200 МГц, который должен был запускаться и останавливаться менее чем за 5 нс [1]. Удалось расположить и растрассировать корпуса быстродействующей эмиттерно-связанной логики серии 100000 (в России и СНГ – серии 100 и 500) один рядом с другим и за счет такой плотной разводки получить возможность очень быстро, быстрее чем за 3 нс, ВКЛЮЧАТЬ и ВЫКЛЮЧАТЬ счетчик импульсов. Большинство разработчиков цифровых систем знают, что при работе с быстродействующими логическими схемами располагать печатные проводники, по которым передаются высокочастотные сигналы, «по-старому – как лягут» просто нельзя. Следует рассматривать эти дорожки как линии передачи и тщательно выбирать их расположение и размеры. Итак, вне зависимости от типа используемых проводников это могут быть полосы фольги на печатной плате, провода при монтаже «накруткой» или проводники в слое металлизации интегральных микросхем.

Большинство разработчиков цифровых схем владеют приемами проектирования разводки печатных плат высокочастотных цифровых схем, обеспечивающими нормальную работу этих схем, без возникновения звона и перекрестных помех. Однако мне известны случаи, когда опытному инженеру-проектировщику цифровых систем было необходимо добавить в один из уголков печатной платы

сугубо цифрового устройства несколько линейных микросхем. И если в подобном случае разработчик плохо представляет себе, каким именно образом следует «разводить печать» для операционного усилителя, то в линейных схемах могут появиться самовозбуждение, паразитные перекрестные связи, и, в конце концов, они будут просто плохо работать. Кроме того, возможность применения «монтажа накруткой» искушает разработчика печатных плат использовать «строгий, регулярный дизайн», располагая все операционные усилители, компараторы, а также резисторы и конденсаторы цепей обратной связи ровными рядами. К сожалению, подобная «строгость» приводит к тому, что некоторые «критичные соединения» оказываются размером несколько дюймов, а шины, по которым идут другие такие сигналы, могут быть проложены слишком близко одна от другой. При таком подходе создателю этой разводки придется ломать голову над тем, почему усилители и компаратор на его плате либо сильно «звенят», либо самовозбуждаются.

Так что разработчикам печатных плат необходимо учитывать, что разводка линейных схем может оказаться весьма сложной задачей. Двухдюймовый (примерно 5 см) промежуток, который, к примеру, вы *никогда* не оставили бы между цифровой интегральной схемой и конденсатором *ее* развязывающего фильтра, ничем не отличается от точно такого же двухдюймового промежутка, который нарушает нормальную работу операционного усилителя в случае, если сигнал на инвертирующий или неинвертирующий вход этого усилителя проходит одинаковое расстояние по пути к различным резисторам или конденсаторам. В последующих главах, посвященных поиску неисправностей активных элементов, я еще остановлюсь на том, что есть веские причины делать дорожки, ведущие к точке суммирования, короткими и располагать их аккуратно и компактно. Кстати отметим, что не стоит полагаться на то, что разработчик печатных плат догадается, какие узлы являются «критичными», а какие нет. Автор схемы должен предоставить перечень всех критичных или чувствительных к помехам узлов, то есть узлов, которые проводят сигналы большого уровня или которые надо располагать подальше от высокочувствительных входных цепей и т.п. Это попросту разумно.

Некоторым инженерам нравится использовать тонкие печатные дорожки из фольги, причем настолько тонкие, насколько это возможно. Другие предпочитают широкие дорожки и малые просветы между ними. Оба эти подхода корректны, но необходимо учитывать преимущества использования больших участков фольги, когда вам понадобится развести на плате мощный транзистор или интегральную схему. От коллектора транзистора в корпусе ТО-92 через его вывод (медный) может отводиться большое количество тепла, и каждый дополнительный квадратный дюйм фольги на печатной плате (как на одной стороне, так и сразу на обеих) помогает рассеивать это тепло и «охлаждать» транзистор. То же относится и к мощным интегральным микросхемам. Заглянув в технические описания интегральной схемы средней мощности, например LM384, на графиках можно увидеть, что если все шесть выводов земли будут отводить тепло от корпуса интегральной схемы к фольге платы, то при использовании двух квадратных дюймов фольги температура этого элемента будет гораздо ниже, чем была бы при использовании минимально необходимой площади. А шесть квадратных дюймов фольги дадут еще более заметный эффект.

Однако было подмечено, что если оставить на плате слишком много фольги, то при пайке «волной» возможна деформация платы.

Часто инженеры исходят из предположения, что дорожка на печатной плате практически не имеет сопротивления, соответственно падения напряжения на ней нет. Однако если по печатному проводнику будет течь ток большой силы, то вы будете неприятно удивлены тем, что на ней зафиксируется падение напряжения, равное $I \times R$. Классическим примером этого может служить разводка платы, где в качестве «малосигнальной земли» предварительного усилителя используется шина, по которой одновременно текут возвратные токи сетевого выпрямительного моста и сглаживающего конденсатора. В этой возвратной цепи 120 раз (в России – 100 раз) в секунду наблюдаются импульсы тока «амперной» амплитуды. Нечего и говорить, что предусилитель не станет «малошумящим» до тех пор, пока контур, в котором присутствуют импульсы тока, не будет «навсегда разведен» с «малосигнальной землей» предусилителя. Если вы хотите, чтобы созданные вами печатные платы работали очень точно, то необходимо предусмотреть в разводке этих плат хорошо продуманную систему земляных шин для высокочувствительных участков схем.

Если вы задумаетесь об этом, то поймете, что разделение шин «силовой земли» источников питания, по которым может идти ток большой силы, и высокочувствительных усилителей напряжения напоминает четырехпроводные схемы подключения (их также называют схемами Кельвина), часто используемые в измерительной технике. В четырехпроводной схеме, как следует из названия, используются четыре провода: одна пара проводов предназначена для подачи тока в цепь, а вторая – для измерения напряжения на зажимах этой цепи. Разрабатывая печатную плату, не упускайте из виду принцип четырехпроводных схем, это поможет оптимизировать топологию земляной шины. При рисовании схемы я индивидуально помечаю «земли» каждого из каскадов. Если в какой-нибудь из «земель» протекает много «грязных» токов, то она относится к «земле» питания или силовой, если же заземляются абсолютно «чистые» участки схемы, то мы относим ее к «чистой», или сигнальной «земле», и помечаем треугольным символом. Таким образом, две разные «земли» будут соединяться только в одной точке.

Рассказывать об особенностях печатных плат с поверхностным монтажом не входит в мои планы, так как я с ними не работал и не являюсь по ним экспертом. Слышал, что разработка подобных плат, безусловно, является более сложной задачей и требует более кропотливой каждодневной работы. Иначе говоря, если вы являетесь высококлассным специалистом в разработке обычных печатных плат, то, вероятно, сможете, хорошенько изучив особенности, впоследствии успешно справляться с разработкой печатных плат под поверхностный монтаж. Если вы не являетесь высококлассным разработчиком печатных плат, то конструированием плат для поверхностного монтажа, пожалуй, лучше не заниматься, пока не появится надлежащий опыт.

После того как ваша плата будет готова, одной из самых сложных станет проблема температурных циклов и градиентов. Для корпусов микросхем таких типов, как LCC (leadless chip carrier – безвыводные кристаллодержатели), проблемы возникнут в силу нулевой длины выводов – у них отсутствует механическая гибкость.

Если коэффициент теплового расширения материала печатной платы отличается от коэффициента теплового расширения материала корпуса интегральной микросхемы, в паяных соединениях могут появиться усталостные явления, вызванные циклическими механическими напряжениями в результате резких перепадов температур. Такие соединения могут быстро разрушиться. Этот исход наиболее вероятен, если плата должна работать в широком (соответствующем требованиям к аппаратуре военного назначения) диапазоне температур – и именно там, где от устройства требуется особая надежность. Коммерческие интегральные схемы для поверхностного монтажа с выводами в форме крыла чайки или с J-образными выводами более гибки и менее капризны, создают меньше проблем, хотя требуют к себе серьезного внимания. Много припоя – выводы становятся очень жесткими; мало – они просто не держатся на плате.

5.4. Четырехпроводная схема, или Схема Кельвина

Мало кто знает о том, какую пользу можно извлечь из контактных систем и топологий, выполненных по схеме Кельвина. Когда Джулия Шофилд (Julie Schofield), редактор журнала EDN, недавно задала мне несколько вопросов на эту тему, я, к своему удивлению, обнаружил очень мало печатного справочного материала, в котором затрагивался бы этот вопрос. Я просмотрел несколько десятков справочников и книг и не обнаружил нигде приемлемого определения или объяснения. Мне все же удалось найти в каталоге компании Keithley упоминание о неких «зажимах Кельвина», способствующих проведению измерений с использованием четырехпроводной схемы подключения. Также я обнаружил несколько справочных листков по разъемам компании Textool, в которых упоминались, как нечто само собой разумеющееся, преимущества использования схемы Кельвина. Я попробую детально объяснить, что это такое, так как ни Джулия, ни я не смогли отыскать полного научного описания или определения этих элементов ни в одной технической энциклопедии.

Наверное, четырехпроводные схемы наиболее широко применяются в системах промышленной автоматики и дистанционного контроля. Использование четырехпроводных схем или разъемов позволяет подавать точно заданное напряжение непосредственно на контакт или вывод исследуемой схемы независимо от длины соединительных проводов.

Если не контролировать с большой точностью напряжение питания, то может получиться так, что будут забракованы элементы, полностью соответствующие предъявляемым к ним требованиям.

Предположим, к примеру, что надо протестировать коэффициент стабилизации (нестабильность выходного напряжения) по нагрузке 5-вольтового стабилизатора LM323. При этом входное напряжение V_{in} будет в точности соответствовать +8,00 В, а нагрузка изменяться от 5 мА до 3,00 А (см. рис. 5.4). В этой схеме задействованы четыре пары подключений по четырехпроводной схеме. Первая пара подключается к выходу источника питания. С помощью пары измерительных проводов этого программируемого источника питания можно поддерживать точное, равное 8,00 В, значение напряжения непосредственно на зажимах исследуемого устройства. Применительно к источникам питания такой способ подключения обычно называется «remote sense», но в данном случае перед нами схема Кельвина.

Это очень важно, так как если бы напряжение питания упало с 8 до 7,9 или 7,8 В, то наши измерения были бы некорректными.

Второе четырехпроводное подключение, как показано на рис. 5.4, используется на выходе исследуемого устройства. Для того чтобы можно было наблюдать за изменениями V_{out} при подключении различных нагрузок, в схеме Кельвина есть силовые провода, по которым течет выходной ток силой 3 А. В схеме также есть измерительные провода, которые позволяют контролировать выходной сигнал, используя вольтметр с высоким входным сопротивлением. Обратите внимание, что к выводу ОБЩИЙ исследуемого стабилизатора подключены два силовых и два измерительных провода. На самом деле все *четыре* провода могут и не понадобиться – без ущерба для результатов допускается объединить попарно оба силовых и оба измерительных провода. По измерительным проводам большой силы токи протекать не будут, а что касается силовых проводов, то нас не интересует ни то, какой силы ток течет по ним, ни точное значение падения напряжения на них.

Операционный усилитель в схеме, показанной на рис. 5.4, управляет выходным током исследуемого устройства, который течет через составной транзистор (схема Дарлингтона), а после этого через прецизионный резистор сопротивлением 0,1 Ом. Единственный способ добиться требуемой точности и повторяемости при использовании этого резистора – применение четырехпроводной схемы подключения, как показано на рис. 5.4. С помощью операционного усилителя режим схемы можно выбрать так, что напряжение на верхнем (по схеме) измерительном проводе будет точно на 300 мВ превышать напряжение на нижнем, даже в том случае, если напряжение на нижнем выводе резистора будет отличаться от напряжения на земляном выводе из-за падения его на многочисленных проводах и соединителях.

В этой цепи есть несколько участков, которые могли бы служить «землей», но единственная «земля», к которой можно подключить 300-омный резистор и получить хорошие результаты, – это измерительный провод, подсоединенный к нижнему выводу резистора номиналом 0,1 Ом. Если нижний вывод 300-омного резистора будет подсоединен к какой-либо другой «земле», то изменения падения напряжения на проводах неизбежно вызовут относительно большие, непредсказуемые и недопустимые изменения силы тока, изначально определенной в 3 А. Иначе говоря, появятся Неточности и Неисправности.

Итак, если по вашим понятиям в схеме должны использоваться большие токи, то подумайте о падении напряжения $I \times R$ на различных разъемах и проводниках. И если вы считаете, что падение напряжения $I \times R$ может вызвать проблемы, то попробуйте применить четырехпроводные схемы – вероятно, это позволит избежать проблем.

Четвертая из используемых на рис. 5.4 схем Кельвина спрятана внутри 5-вольтового стабилизатора LM323, в котором предусмотрено отдельное подключение силовой и измерительной цепей к выводу выхода стабилизатора.

Пятая схема Кельвина также скрыта внутри микросхемы стабилизатора, в каскаде ограничения тока. В нем ток нагрузки определяется с помощью резистора, подключенного по четырехпроводной схеме и передающего получающееся напряжение на измерительный усилитель схемы ограничения тока.

Область применения разъемов со схемой Кельвина не ограничивается большими мощными транзисторами либо сильноточными цепями. Представим себе

источник опорного напряжения с током покоя 2 мА. Если вы пытаетесь исследовать источник опорного напряжения, коэффициент нестабильности которого 1 млн^{-1} и сопротивление в цепи «земли» изменится на 5 мОм (такое изменение большинство изготовителей разъемов считают допустимым), изменение напряжения на 10 мкВ, вызванное увеличением сопротивления в цепи «земли», может исказить результаты проводимых измерений. Чтобы избежать неприятностей при прецизионных измерениях, надо отказаться от использования разъемов или, по крайней мере, использовать разъемы со схемой Кельвина. Лорд Кельвин – до получения баронского титула Вильям Томпсон (Kelvin – William Thompson) – и в самом деле создал большое количество полезных вещей.

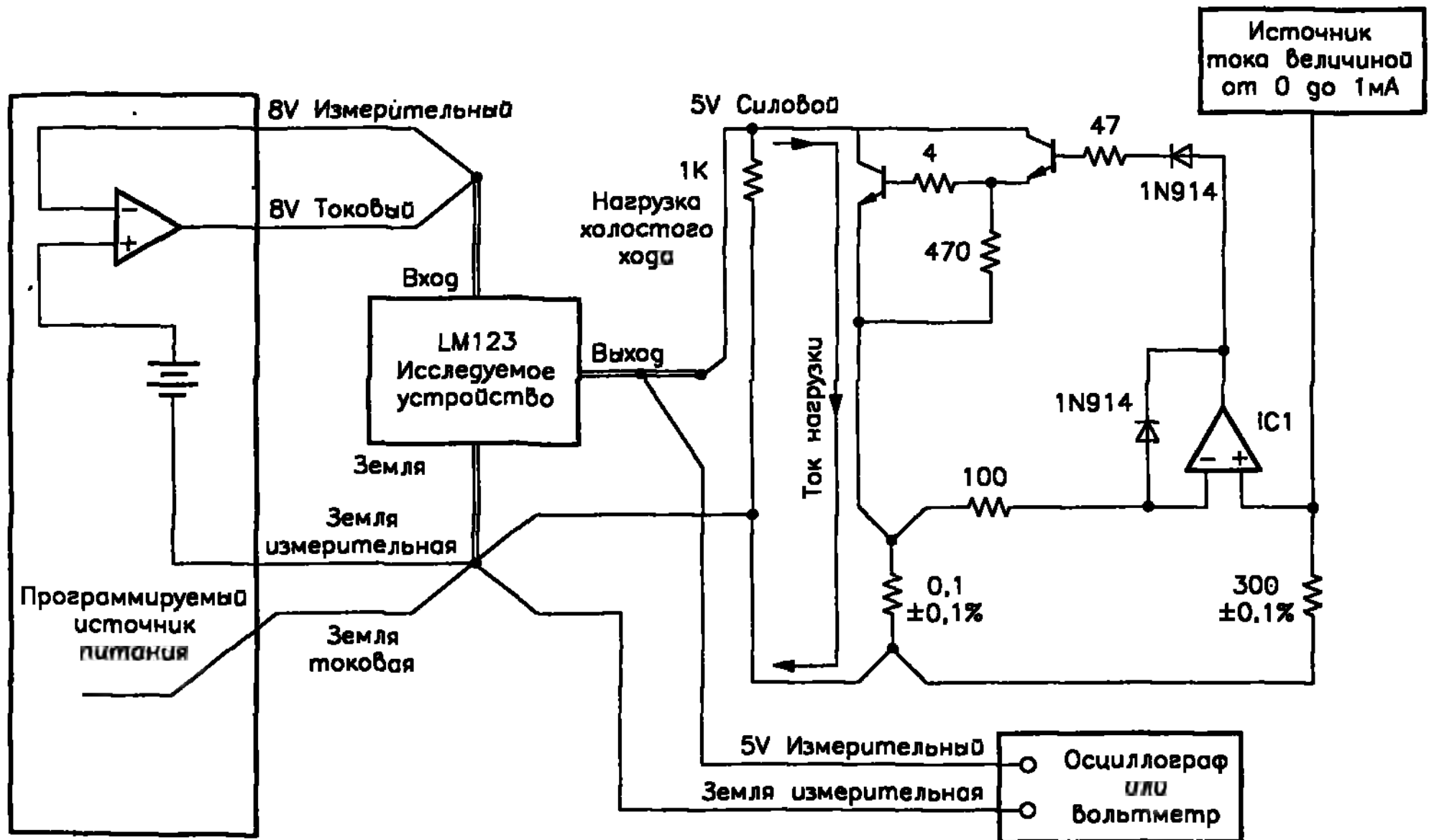


Рис. 5.4. Схема проведения испытаний силовых устройств

Схема с использованием как минимум четырех пар четырехпроводных схем подключения (Кельвина), позволяющая избежать ошибок в измерениях, вызванных падением напряжения $I \times R$ на проводах в исследуемой схеме и на ее зажимах.

Примечание к рис. IC1 – LM607 или аналогичный операционный усилитель с напряжением питания $\pm 15 \text{ В}$.

5.5. «Холодные» пайки

Обычно для пайки используется обыкновенный трубчатый оловянно-свинцовый припой с флюсом. Если паяемые элементы остаются неподвижными до тех пор, пока припой не остынет, то можно избежать образования соединения с так называемой «холодной пайкой».

Однако следует знать, как выглядит такое соединение и каких бед оно может натворить, особенно в высокочувствительных схемах. Меня печалит то, что современные молодые люди не собирают электронные устройства из конструкторов

или наборов деталей. В старые добрые времена, собрав несколько самоделок из конструкторов компании Heathkit или Knightkit, можно было все узнать о «холодной» пайке. Я по много раз собирал различные устройства из таких конструкторов. При этом у меня образовалось несколько холодных паек, и мне пришлось их искать и исправлять. При промышленном производстве от «холодных» паек очень просто избавиться, используя современное оборудование для пайки волной припоя. Однако в схемах, монтируемых вручную, вероятность появления «холодных» паек всегда существует, так что если вам докучает какая-либо проблема, то не забудьте о проверенном методе: пропаяйте заново каждую пайку на плате или в устройстве. Иногда будут попадаться места, в которых припой, кроме лужения, вообще никогда не было!

Если у вас для тех или иных целей есть припой с активным флюсом (американское название – acid-core) – в основном такой припой используется водопроводчиками и в большинстве радиоэлектронных лабораторий его не найти, причем по ряду веских причин, – хранить его надо изолированно от обычного припоя с канифольным флюсом. Кислота из остатков флюса будет сильно разъедать проводники. Чтобы избежать путаницы, необходимо хранить отдельно и другие специальные припои: тугоплавкий, легкоплавкий, серебряный и алюминиевый. Есть еще и припой для нержавеющей стали, для которого требуется особый флюс.

Недавно я слышал, что серебряный припой рекламировали как суперприпой для изготовления кабелей для громкоговорителей. В описании к набору Golden Ear утверждается, что при использовании этого припоя звук становится лучше. Однако хотелось бы отметить, что для пайки серебряным припоем требуется довольно высокая температура, так что понадобится небольшая паяльная горелка и флюс на основе буры. Я считаю, что повреждения, которые будут нанесены высокими температурами изоляции и медному проводнику (в результате сильного окисления), перевешивают все преимущества «высококачественного паяного соединения».

5.6. Радиотехника – наука о контактах

Печатная плата – это не единственная сборочная единица, с которой приходится разбираться, пытаясь заставить схему заработать. По сюжету завоевавшей Пулитцеровскую премию книги Трейси Киддера (Tracy Kidder) “The Soul of a New Machine” [2] один из критических моментов наступает, когда инженеры-разработчики заявляют группе руководителей проекта, что у их нового компьютера есть один дефект, который проявляется очень редко и локализовать его не удастся. На это один из менеджеров задумывается на некоторое время, а затем с *хрустом* гнет материнскую плату. К ужасу и удивлению инженеров проекта каждый *хруст* совпадает с проявлением отказа. После того как на материнской плате заменили панельки для микросхем DIP, сбои прекратились.

Мы привыкли считать, что разъемы или иные соединительные элементы должны, подобно верным псам, нести службу, не вызывая нареканий. Чаще всего так и бывает. Однако в тех редких случаях, когда разъем действительно отказывает, то перед выходом устройства из строя неполадка носит «перемежающийся» характер. К счастью, многие инженеры и техники быстро постигают истину: чтобы найти

случайным образом проявляющийся отказ, нужно спровоцировать его появление, а для этого можно, например, покачать плату в разъеме, погнуть ее в обе стороны, несколько раз вынуть-вставить ее при включенном питании.

Но ведь во всех руководствах сказано, что нельзя вставлять плату в разъемы при включенном питании. Не так ли? Несомненно, в большинстве руководств именно это и сказано. Но, вставляя плату в «горячий» разъем, я ни разу не попадал в ситуацию, которая была бы хуже, чем та, которая стала причиной неприятностей. Могут встретиться платы, которые в результате описанных действий будут повреждены или выведены из строя, но таких плат очень немного и они требуют особого изучения. Один из способов, который может помочь избежать проблем, заключается в том, что на основном разъеме печатной платы контакты общего провода или «земли» делаются немного длиннее, чем остальные. В результате заземление платы будет обеспечено до того, как будут выполнены все остальные подключения. Тем не менее, если у вас есть плата, которая, скорее всего, «защелкнется» из-за нарушения последовательности подачи напряжений питания, то нужно быть готовым к тому, чтобы прекратить установку платы в разъем – и очень быстро.

5.7. Неординарные методы

Мы все склонны постигать новое, чаще всего держа в руках конкретный предмет, щупая его и пытаясь разобрать, причем исключительно с помощью размышлений. Как-то раз я работал с техником, который считал, что DIP-панельки следует фиксировать не парой паек, а клеем. Такой способ отлично работал некоторое время, но иногда в панельках пропадал контакт – то у одного вывода, то у другого. Для того чтобы решить проблему, мы воспользовались известным методом: проверили прохождение сигнала во входной цепи этой интегральной схемы, все оказалось нормально. Стали проверять на выходе интегральной микросхемы – сигнала не было. После этого решили измерить сигналы непосредственно на контактах самого DIP-корпуса микросхемы – оказалось, что они отличаются от сигналов на выводах панельки, причем сильно отличаются. Я, наконец, понял, что клей проник во внутреннее пространство панельки и четкий контакт между ламелями в панельке и выводами интегральной схемы нарушался.

Отказавшись от использования клея, проблему удалось решить. Тем не менее, как до того, так и после, нам встречались панельки, которые просто не обеспечивали контакта с выводами интегральной микросхемы. Чтобы выявить подобную неприятность, следует проверять сигналы не только на контактах панельки, но и непосредственно на выводах интегральной микросхемы, которая в панельку установлена. Бывает так, что вывод интегральной микросхемы нормально входит в панельку, но нет контакта с ее ламелями. Как чаще всего бывает, вывод просто гнется, а увидеть его под корпусом практически невозможно.

Мой друг рассказал мне еще об одной причине возникновения проблем с панельками. Однажды он пытался отыскать неисправность в очень простой схеме с одним операционным усилителем, но сигналы, снимаемые в разных точках схемы, были совершенно невероятны. После нескольких минут внимательного изучения

он перевернул макет и понял, что забыл вставить собственно операционный усилитель в эту злополучную панельку. Из этого примера следует закон МакКенны (McKenna's Law), названный так в честь моего друга: «Не посмотришь – не увидишь». Мы вспоминаем этот закон каждый раз, когда выясняется, что забыли включить питание или подключить какое-нибудь устройство, блок или деталь.

В процессе поиска неисправностей надо всегда помнить, что рассеянность и неорганизованность неизбежно подведут под действие закона МакКенны.

Разъемы и другие соединительные элементы обычно приносят все-таки больше пользы, чем вреда. С их помощью можно проверять различные варианты и проводить эксперименты, которые, несмотря на кажущуюся абсурдность и нелепость, стоит реализовать в целях самообразования. Как-то раз один из моих друзей практически погибал в тяжелой неравной битве, пытаясь выявить неисправность в быстродействующем аналого-цифровом преобразователе. Он перепробовал массу вариантов, но решить проблему максимальной скорости работы ему никак не удавалось. Когда он спросил меня, не стоит ли проверить, насколько сильно влияет панелька на работу преобразователя, поначалу я был против. Но, обдумав ситуацию, сообразил, что панелька может добавить дополнительную емкость всего лишь 1 пФ. Тогда я сказал ему: «Попробуй, большого вреда от этого не будет».

Исследование схемы вместе с панелькой позволило определить, что неприятности со скоростью были тесно связаны с этим преобразователем, и проблема была вскоре решена. Панелька, использование которой могло бы вызвать существенные потери, на самом деле практически не мешала работе устройства, а способствовала поиску настоящей причины неудачи. Панелька приносит немного вреда, зато, если она есть, вы можете провести множество экспериментов, которые, в свою очередь, дадут вам жизненно необходимую подсказку и наведут на след «настоящего преступника».

5.8. Реле и контакторы

Сейчас реле используются не так широко, как раньше, но существует ряд ситуаций, когда, применив реле, можно выполнить задачу исключительно эффективно. Известно множество способов эффективного использования реле. Однако реле можно применять и так, что проблем только добавится. Вам этого, естественно, не нужно. Вот и обсудим, как с ним обращаться.

В некоторых реле используются позолоченные или покрытые другими драгоценными металлами контакты, что обеспечивает их высочайшую надежность в слаботочных цепях. Что понимать под термином «слаботочные»? При разработке каждого устройства, использующего реле, придется обратиться к техническим описаниям их производителя. Это очень важно. Ведь если попытаться использовать слаботочное реле в силовых устройствах, то его контакты могут подвергнуться электроэрозии, будут быстро изнашиваться или могут даже сплавиться. И наоборот, если использовать силовое реле, на котором установлены контакты, изготовленные из специальных сплавов или вольфрама, то в высокоомных цепях они будут работать «всухую» и получить электрическое соединение между контактами реле вообще не удастся. Золото – это отличный (хотя и дорогой) материал, используя

его, можно предотвратить работу контактов «всухую», однако в сильноточных контактах золото не применяется.

Герконовые реле запаяны герметично. При правильном использовании они имеют исключительно высокую надежность. Недавно я оценивал качество нескольких таких реле¹, которые, после того как я предпринял все необходимые меры предосторожности, имели токи утечки менее 5 фА (10^{-15} А). Я был поражен. Конструкция этих реле может обеспечить низкие значения паразитных термо-ЭДС и малое время срабатывания и отпускания, но для управления ими требуется много ампер-витков, так как в их магнитной цепи нет железа – поэтому обычно их не рассматривают как малопотребляющие устройства.

Да, еще пара слов о герконовых реле. Если смонтировать чистую стеклянную трубку внутри качественно сделанной катушки, то вы, возможно, добьетесь вышеприведенных ничтожно малых значений токов утечки. Но если вы купили герконовое реле с уже готовой обмоткой и аккуратно упакованное, то я знаю, из чего сделан корпус реле, – из нейлона (капролон В). При комнатной температуре нейлон представляет собой прекрасный изолятор, но уже при температуре 35 °С в условиях высокой влажности нейлон становится НЕПОТРЕБНЫМ. Удельное сопротивление не достигнет даже 10^9 Ом. Итак, если вам нужно реле с действительно малыми токами утечки, то, возможно, будет проще всего обмотку управления для такого реле намотать самому.

У всех механических реле контактыдребезжат в течение 2–29 мс, и продолжительность этого явления может меняться. Если вы хотите, чтобы реле или переключатели нормально работали с цифровыми логическими схемами, необходимо использовать схемы подавлениядребезга. Помимо того, если на контакты реле подается ток или напряжение хотя бы средней величины, то производитель обычно оговаривает необходимость установки параллельно контактам RC-цепочек для подавления искрения и выгорания контактов. Короче, от чтения технических описаний вам не увильнуть.

Но в настоящее время не все реле – механические. Прежде всего существуют реле с ртутными контактами, и считается, что у нихдребезга нет. Большинство из таких реле необходимо монтировать в вертикальном положении, или они не будут работать. Есть ртутные реле, у которых нетдребезга, а работать они могут в любом положении. Но и они не будут функционировать при температуре ниже –38 °С, так как ртуть замерзнет.

Кроме того, есть полупроводниковые (твердотельные) реле. Некоторые из таких реле могут переключать токи достаточно большой величины, но в них часто используются КУВы (кремниевые управляемые выпрямители, попросту тиристоры или симисторы), и в силу этого падение напряжения на них превышает 1 В. Такие реле не удастся использовать для слабых сигналов. В других используются МОП транзисторы с малым сопротивлением открытого канала, и реле этого типа могут управлять токами силой до нескольких ампер с малыми потерями. Однако мощные реле имеют значительные утечки и порядочную емкость (что

¹ Coto Type 1240-12-2104, Coto Corporation, 55 Dupont Drive, Providence, Rhode Island 02907. (401) 943-2686.

не всегда учитывается). Для прецизионной работы предназначены нежные и хрупкие маленькие реле, но по ним не пропустить много миллиампер.

Для того чтобы обеспечить высокую степень надежности, при выборе реле необходимо иметь глубокие знания предмета, предусмотрительность и самокритичность. В противном случае вы выберете такие модели, которые не совсем подходят, и, к вашему удивлению, часть из них будет работать нестабильно и ненадежно, или они будут отказывать быстрее, чем хотелось бы.

5.9. Выключатели, переключатели и тумблеры

При выборе переключателя необходимо учитывать, что к его контактам предъявляются практически те же требования, что и к контактам реле. Есть выключатели для больших токов, есть миниатюрные, есть герметизированные. Так что при выборе выключателя будьте так же внимательны, как и при выборе реле. В данном случае, правда, есть преимущество: если попробовать вывести из строя реле, то несколько миллионов срабатываний могут привести к отказу всего за пару недель, но большинство людей не сможет вручную выработать ресурс выключателя достаточно быстро для того, чтобы это привело к катастрофе. Как и при работе с реле, если вы не уверены, что точно понимаете, о чем написано в технической документации, попросите совета и разъяснений у специалистов завода-изготовителя. Возможно, у них в «загашнике» найдется именно тот выключатель, который вам нужен.

5.10. Провода и кабели

Теперь хочу представить вашему вниманию несколько серьезных замечаний о проводах и кабелях. Не все провода одинаковы. Например, когда меня впервые приняли на работу на предприятие электронной промышленности, у меня было много проблем с проводами во фторопластовой изоляции. Провода очень часто обламывались прямо в том месте, до которого затекал припой. После того как несколько инженеров заверили меня, что все провода одинаковы, и предположили, что я просто выдумываю глупости, я был готов закричать от досады.

Мне встретился инженер, предположивший, что производители кабелей *не смогли бы* разместить обычные луженые провода в изоляцию из фторопласта, как это делается с изоляцией из обычных полимеров. При температуре экструзии фторопласта припой плавится и соединяет все жилы вместе, и в результате из многожильного провода получается одножильный. Вместо лужения в проводах с фторопластовой изоляцией производители кабелей используют жгуты посеребренных проволок. В проводах такого типа припой легко затекает внутрь жгута, поэтому провод становится очень ломким. Разобравшись с особенностями проводов, я сумел разрешить проблему, добавив защитные припуски в местах изгибов или действия растягивающих нагрузок.

Как уже было отмечено в главе 2, одножильные провода с изоляцией из обычных полимеров обладают достаточной жесткостью и из них можно сделать витую пару для подстроечных конденсаторов емкостью 1; 2,1 или 4,95 пФ. У такого провода изоляция не фторопластовая, но качества ее вполне достаточно для большинства прикладных задач.

5.11. Выбор проводов

У экранированных или коаксиальных кабелей, таких как RG-58U, RG-174, экранированной витой пары и прочих специальных плоских кабелей есть свое место при передаче сигналов отсюда-туда без больших потерь и перекрестных наводок. Если вокруг вас множество проводов, соединенных в жгуты в непонятном порядке, а паразитных перекрестных помех нет, значит, вам явилось чудо.

Часто такие жгуты приходится расплетать и прокладывать отдельно те провода, которые сильно лучат, или те, по которым передаются чувствительные к внешним воздействиям малые сигналы. А закончиться это может тем, что вам придется заменить некоторые или даже все провода экранированными кабелями.

Помните: фторопласт – хороший изолятор, но воздух все же лучше. Не раздумывайте, даже если требуется разместить добавочные стойки, лепестки или шайбы для того, чтобы гарантировать, что важные высокочувствительные провода ничто не побеспокоит. Если же возникнут проблемы, то попробуйте попросить совета у производителей проводов.

Используя фторопласт или воздушные промежутки, вы заботитесь о надежной изоляции, точно так же необходимо заботиться и об обеспечении проводимости. Один из моих друзей, заядлый радиолюбитель-коротковолновик, рассказывал мне, что в ВЧ схемах возникает множество разнообразных проблем, вызванных использованием болтов и гаек в элементах заземления. Если при этом не используется контрольная или корончатая шайба (звездочка), то механический контакт может ослабнуть. При этом сопротивление заземляющего контура изменяется при каждом, даже ничтожном нажатии или деформации, что приводит к появлению раздражающих периодических проблем с соединением. Таким образом, основным фактором обеспечения надежности подобных систем является надежность всех резьбовых соединений, в которых следует обязательно использовать корончатые стопорные шайбы. Кроме того, необходимо проверить закрепление всех проводов и разъемов, чтобы это не влияло на общую надежность схемы или устройства. (См. замечания по поводу «звездочек» в главе 13.)

При использовании экранированного кабеля возникает вопрос: как заземлять его оплетку – с двух сторон или достаточно с одной? Множество примеров говорит в пользу заземления со стороны приемного устройства, но в ряде случаев экран используется в качестве «земли» для возвратных токов. Каждый способ может быть и хорош, и плох, поэтому применять их надо с умом. Более того, при разработке конструкции платы и ее производстве необходимо избегать образования паразитных «земляных петель», которые могут вызвать трудно поддающиеся локализации проблемы с шумами и наводками. В создаваемых мной системах я полностью разделяю аналоговую часть земляной шины и «земли» цифровой части устройства или системы и проверяю, что заземления корпуса или шасси также сделано отдельно. После того как с помощью омметра я убеждаюсь, что эти три части системы заземления независимы, я прокладываю один провод от «земли» аналоговой части системы к цифровой и еще один – к корпусу или шасси. Этот прием кажется мне очень удачным, рекомендую и вам пользоваться им.

Мало кому известно, что некоторые виды коаксиального кабеля могут портиться, просто лежа на полке. (Так оно и есть, и разрушение идет *быстрее*, если на него

попадают прямые солнечные лучи или дождь.) У отдельных видов коаксиальных кабелей с похожими кодами и техническими характеристиками внешняя оболочка иногда не имеет гарантированной химической стойкости. Их покрытие может быть особо устойчиво к одним химическим веществам, но менее устойчиво к другим. В частности, в 50-е годы на распродажах излишков военного ведомства можно было встретить огромное количество кабеля, *идентичного* RG-58 и RG 74, недостаточно стойкого к внешним воздействиям. По мере разрушения внешней оболочки происходило химическое разрушение внутреннего изолятора, в результате чего увеличивалось затухание сигналов СВЧ. В других случаях экранирующая оплетка подвергалась химическим воздействиям и корродировала, ее проводимость ухудшалась и затухание сигналов СВЧ опять-таки увеличивалось. Этот старый кабель уже не выпускается, и его невозможно найти даже на свалках. Но до сих пор производятся и продаются кабели специальных типов, которые не могут служить столь долго и портиться столь медленно, как свойственно хорошему кабелю. Если вы выберете кабель, который особо устойчив к одному типу химических веществ, то, по сравнению с обычным кабелем, он может быть хуже защищен от разрушения в нормальных условиях. Таким образом, следует учитывать, что даже в таких простых вещах, как провода и кабели, может оказаться больше проблем, чем предполагается на первый взгляд.

Кстати, у меня за окном кухни висела пара проводов во фторопластовой изоляции длиной два метра каждый, которые вели к датчику электронного термометра. В среднем провода могли облучаться прямым светом солнца не дольше 1 ч в день. Через десять лет желтый провод был все еще в отличном состоянии, а изоляция белого разрушилась полностью. Кто-нибудь хочет попробовать это объяснить?

Недавно один инженер поделился со мной результатами исследований специальных проводов для подключения громкоговорителей. Исследования показали, что индуктивность обычного двухжильного кабеля (на длине 7 метров) может вызвать небольшой, но заметный фазовый сдвиг – около 10° при частоте сигнала 20 кГц – даже при использовании дорогих кабелей для колонок (от \$10 за метр) с жилами большого сечения. Но когда изучили обычный «ленточный» плоский кабель с 40 жилами (обычно используется для передачи цифровых сигналов) и соединили провода параллельно через один в качестве «горячего» конца, а остальные провода также соединили параллельно, но в качестве возвратного (земляного), то индуктивность такого «кабеля» стала в 10 раз меньше.

Если обдумать эти результаты, можно сделать вывод: несколько отрезков кабеля, скажем телевизионного, соединенных параллельно (например, 10 таких отрезков), представляют собой линию передачи, которая обладает исключительно равномерной и широкой полосой пропускания и отлично подходит для работы на 8-омную нагрузку. По сравнению с некоторыми толстенными кабелями, этот гораздо лучше: занимает меньше места и, что немаловажно, стоит намного дешевле.

Литература

1. Pease, Robert A., "Programmable Pulse Takes 5-nsec Steps", *EDN*, May 10, 1990, с. 150.
2. Kidder, Tracy, *The Soul of a New Machine*, Avon Books, New York, 1981, с. 265.

6. ДИОДЫ

Рассмотрев в первых пяти главах вопросы, относящиеся к поиску неисправностей, связанных с пассивными элементами, мы переходим к проблемам поиска неисправностей, вызываемых *активными* элементами. Начнем с самого простого – с диодов, выпрямителей, оптоэлектронных приборов и устройств, солнечных батарей и гальванических элементов (обычных батарей).

Даже самые простые активные элементы могут стать причиной возникновения чрезвычайно трудных для разрешения проблем. Рассмотрим элементарный диод. Задачу диода можно сформулировать легко: пропускать ток при прямом смещении и блокировать протекание тока при обратном смещении. В последнем случае допускается незначительная утечка. При всей простоте задачи идеальных диодов не существует, и их несовершенство просто изумляет. Эти приборы всего-то с двумя выводами на самом деле далеко не просты!

Все диоды начинают пропускать ток по экспоненциальному закону при очень малых уровнях – от 1 нА и выше. У идеального диода экспоненциальная характеристика имеет наклон $\Delta V / \Delta I$, коэффициент которого

$$g = (38,6 \text{ мСм/мА}) \times I_F,$$

где мСм – миллисименс, а I_F – сила тока, текущего в прямом направлении.

И точно так же при комнатной температуре для эмиттерных переходов транзисторов коэффициент наклона равен 38,6 мСм/мА. Это соответствует 60 мВ при изменении силы тока на декаду. Однако коэффициенты наклона экспоненциальных кривых у различных реальных (двухвыводных) диодов значительно разнятся. Для некоторых диодов, например типа 1N645, этот коэффициент составляет 70–75 мВ на декаду, что очень неплохо. У других, к примеру типа 1N914, этот коэффициент не очень хорош – 113 мВ на декаду. У третьих коэффициент, то есть наклон средней крутизны, – около 90 мВ на декаду. При покупке диодов *никогда* нельзя найти коэффициент наклона в справочных данных. По правде говоря, вначале я даже не осознавал этого в полной мере. В первом варианте этой главы, опубликованной в EDN, я предполагал, что коэффициент наклона у диодов начинается с 60 мВ на декаду, затем ухудшается и при больших токах достигает

уровня 120 мВ на декаду. Об этом я и рассказал в своей статье. Но я был не прав. И никто мне не возразил. Что за странный мир!

Взгляните на рис. 6.1, где приведены несколько различных вариантов кривых, которые соответствуют широко распространенным диодам. Ни одна из них не является точной и характерной: если вы меняете поставщика, то «все ставки сгорают». Так что, подбирая диоды для разрабатываемого устройства, каждый раз внимательно оценивайте поставщика. (Более детальный комментарий к этим графикам и таблицу, точно показывающую, какой график какому диоду соответствует, см. в приложении Е.)

По мере возрастания силы тока отношение проводимости к заданной в миллиамперах силе тока (мА) падает еще сильнее, что вызвано объемным сопротивлением базы, инжекцией и другими нелинейными факторами. Следовательно, при большом прямом токе прямое напряжение V_F на этом диоде будет гораздо больше теоретического значения и гораздо больше желательного уровня. Некоторые выпрямители, безусловно, *могут* – в зависимости от их назначения – работать при больших токах (от А до кА). Но при этом прямое напряжение V_F на всех диодах, вне зависимости от их назначения, отличается от теоретически рассчитанного.

В настоящее время на диодах Шоттки прямое падение напряжения V_F меньше, чем на обычных полупроводниковых диодах. И тем не менее все еще сохранились приверженцы германиевых диодов и выпрямителей, так как небольшое прямое падение напряжения на этих диодах соответствует этому параметру диодов Шоттки. Я читал о новых германиевых диодах Шоттки, у которых уровень прямого падения напряжения V_F еще ниже.

Также производятся быстродействующие и сверхбыстродействующие (иногда еще называемые высокоэффективными) кремниевые выпрямители, они были разработаны для высокочастотных импульсных стабилизированных преобразователей и других быстродействующих устройств. У них не столь малое V_F , как у диодов Шоттки, и они не настолько быстродействующие, зато предназначены для работы при больших обратных напряжениях, поэтому находят широкое применение в многочисленных импульсных и ключевых схемах и устройствах, где на диодах обратные напряжения высоки.

Разброс параметров будет еще больше, если сравнивать диоды при обратном смещении. К примеру, в технических характеристиках многих типов диодов гарантируется, что максимальное значение обратного тока не превышает 25 нА при 25 °С. Если проверить эти диоды, то оказывается, что утечка у многих из них на самом деле составляет только 50–100 пА. Однако у широко распространенного диода 1N914 и его ближайшего родственника 1N4148 утечка при комнатной температуре действительно около 10 или 15 нА, а объясняется это тем, что для них используют легирование золотом. Поэтому, несмотря на то, что эти диоды очень популярны и дешевы, было бы ошибкой использовать их в тех цепях, где необходима минимальная утечка, так как они «текут» гораздо сильнее, чем диоды других типов с такими же паспортными характеристиками утечки.

Тогда почему же в технической документации на некоторые диоды с небольшой утечкой указывается такое же посредственное значение, что и для 1N914, – 25 нА? Потому что системы автоматического контроля параметров без снижения

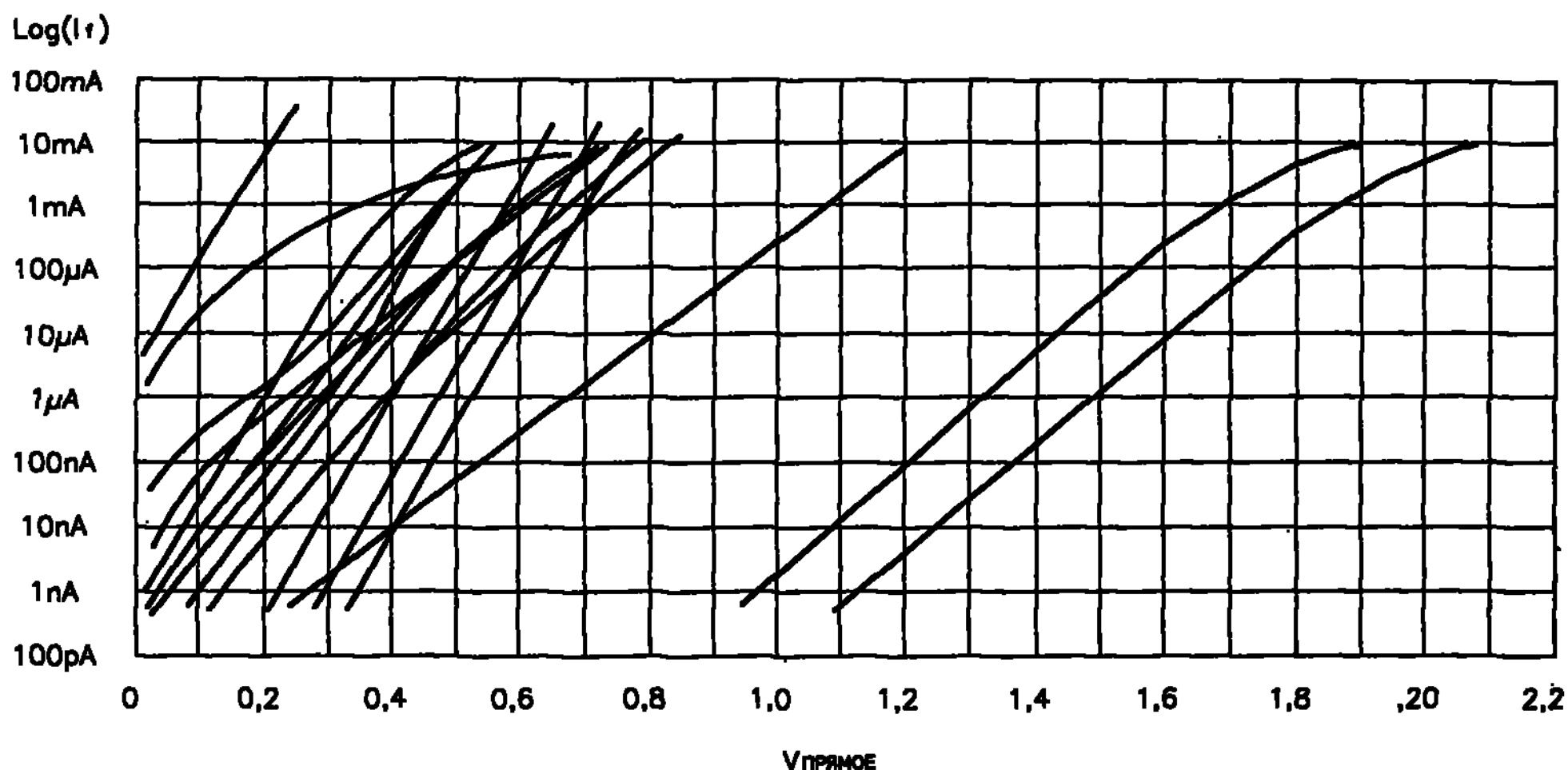


Рис. 6.1. Характеристики диодов в полулогарифмическом масштабе

Диод, в качестве которого используется эмиттерный переход транзистора, обладает высокой проводимостью в широком диапазоне прямых токов. Обычные диоды имеют худшую проводимость, и практически у всех она разная. Более подробная информация содержится в приложении Е.

скорости работы могут проверять утечку не ниже 25 нА. Производители диодов задают такие критерии качества и удерживают цены, адекватные той сумме, которую большинство людей готовы заплатить за диод. Если вам нужен высококачественный диод, паспортное значение утечки которого не превышает 100 пА, то придется доплатить за выходной контроль и разбраковку, требующие дополнительных затрат. Безусловно, у диодов с большой проводимостью, таких как диоды Шоттки, германиевые и мощные выпрямительные, токи утечки при обратном смещении гораздо больше, чем у диодов, применяемых в малосигнальных цепях, но обычно это не проблема.

Если требуется диод с очень малым током утечки, то лучше вместо обычного диода использовать коллекторный переход транзистора [1]. У хорошо известных транзисторов 2N930 или 2N3707 утечка обычно невелика. У некоторых транзисторов типа 2N3904 ток утечки тоже низок. Иногда при производстве этих транзисторов применяется легирование золотом, и утечки возрастают. Элементы в пластмассовых корпусах как минимум не хуже тех, которые выпускаются в герметичных металлоглазанных корпусах ТО-18. То есть можно легко подобрать «диоды» с током утечки в 1 пА даже при обратном напряжении 7 В или 10 пА при 50 В. Хотя столь малые значения токов утечки и не гарантированы, обычно это соответствует действительности. Однако коллекторные переходы, используемые в качестве диодов, не очень быстро открываются и закрываются.

Еще одним источником диодов со сверхнизкими токами утечки являются элементы 2N4117А и РN4117А (–18А, –19А). Это полевые транзисторы с изоляцией рп-переходом. Переходы у них очень маленькие, поэтому обычными являются токи утечки меньше 0,1 пА, а максимальными – 1,0 пА, и эти значения гарантируются изготовителями – неплохо при цене \$0,40. Емкость их перехода также очень низкая.

6.1. Проблемы быстродействия

Если через диод течет ток, то сколько нужно времени для того, чтобы этот ток течь перестал? Это еще один феномен многоликости диодов. Для «медленных» диодов время выключения может составить десятки и сотни микросекунд. При использовании коллекторного перехода транзистора 2N930, для того чтобы ток уменьшился с 10 мА до значения, не превышающего 1 мА, требуется порядка 30 мкс, и еще больше времени потребуется для того, чтобы ток снизился до уровня 1 нА. В основном это зависит от времени рекомбинации носителей, накопленных в коллекторной области транзистора. Другие диоды, в особенности с легированием золотом, выключаются *гораздо* быстрее – время выключения исчисляется наносекундами. Диоды Шоттки еще быстрее, им надо гораздо меньше 1 нс. Однако один из моих друзей отметил, что если в схеме используется диод Шоттки и он выключается очень быстро, то параллельно ему всегда включен обычный рп-переход, выключающийся медленно при том небольшом токе, который все еще течет через диод. Если диод Шоттки при прямом токе 4 мА выключится менее чем за 1 нс, то может присутствовать остаточный ток в несколько микроампер, не прекращающийся и за 1 мкс. Так что если вы хотите использовать в прецизионных схемах привязки или фиксации уровня диод Шоттки, который должен выключаться очень быстро, как, например, в измерителе времени установления [2], то не удивляйтесь, если обнаружится «тонкий, но длинный хвост».

Для нормальной работы всех импульсных стабилизаторов требуется, чтобы диоды, сильноточные выпрямители и транзисторы быстро выключались. Если они будут выключаться медленно, то при высокой частоте преобразования и больших токах они могут отказать из-за перегрева. Не стоит использовать диоды 1N4002 на частоте 20 или 40 кГц, поскольку работать они будут очень плохо. Если в схеме сила тока среднего уровня, но частота большая, то можно установить несколько включенных параллельно диодов 1N914. Я однажды использовал такой вариант в экстренном случае, и кажется, все работало как надо, но по соображениям долговременной надежности не стал бы рекомендовать этот способ.

Для того чтобы схема служила долго и надежно, ее надо разрабатывать так, чтобы она работала именно на той частоте, на которую рассчитана. В вашем распоряжении есть быстродействующие, с малым временем восстановления и сверхбыстродействующие диоды. Диоды Шоттки работают еще быстрее, но высоковольтных диодов такого типа нет. Приступая к разработке импульсного стабилизатора или источника питания, который будет работать на высоких частотах, вы должны понимать все, что делаете. А если не понимаете, то, по крайней мере, наденьте защитные очки, чтобы не пораниться, когда схема взорвется.

6.2. Особенности переходных процессов

«Компьютерные» диоды, такие как 1N914, стали популярными благодаря быстрому выключению – всего за несколько наносекунд, а это гораздо меньше, чем у диодов с малой утечкой. Такие диоды не только быстро выключаются, но обычно и быстро включаются. К примеру, если «подать» импульс тока силой 1,0 мА на

анод диода 1N914, с включенной параллельно паразитной емкостью 40 пФ (20 пФ паразитной емкости монтажа плюс входная емкость пробника осциллографа или чего-то подобного), то 1N914 обычно включается менее чем за 1 нс. Следовательно, V_F будет иметь выброс всего в несколько милливольт.

Однако у некоторых диодов – даже у 1N914 или 1N4148 – прямое напряжение, достигнув ожидаемого установившегося уровня, может нарастать еще в течение 10–20 нс до того, как диод включится. Получающийся выброс 50–200 мВ оказывается полной неожиданностью (рис. 6.2). Еще более удивительно то, что при низких частотах повторения выброс V_F может увеличиваться, зато при высоких – полностью исчезать (рис. 6.2b–d).

Как-то раз я потратил несколько часов на выяснение причин этой странности, когда у преобразователя частота/напряжение внезапно обнаружилась загадочная нелинейность. Самым сложным аспектом проблемы с диодами, использованными в преобразователе, было то, что в работе таких же диодов, но из предыдущей партии признаков медленного включения не обнаружено. Более того, некоторые диоды из партии в 100 штук от одного изготовителя были так же плохи, как и диоды, осциллограммы процесса включения которых показаны на рис. 6.2 (b и c). У остальных диодов из этой партии, а также у диодов других изготовителей выбросы практически отсутствовали.

Когда я стал разбираться с представителями поставщика, то поначалу они пытались отрицать возможность каких-либо различий в диодах, но со временем признались, что были изменены «некоторые диффузии», чтобы «улучшить» конечный продукт.

Как говорится, что для одного благо, то для другого – гибель. Поэтому следует постоянно помнить о том, что изменения технологического процесса могут стать причиной проблем. Когда производители «меняют диффузию», или технологический процесс, или фотошаблоны, то считают, что эти изменения незначительны, однако на работу вашей схемы они могут повлиять очень сильно.

Не вызывает сомнения, что для работы многих схем требуются диоды, умеющие включаться и «держат» или «привязывать» напряжение, скорость изменения которого превышает 20 В/мкс. Следовательно, если вы хотите, к примеру, чтобы схема с быстродействующими импульсными детекторами работала правильно, придется найти поставщика, диоды которого включаются правильно, после чего пользоваться только его продукцией. Таким образом, чтобы избежать проблем от недокументированных параметров и «плохих» радиодеталей, обязательно сначала обмеряйте и проверяйте их и только после этого задавайте нужные вам рабочие характеристики. Кроме того, если требуется, чтобы схема с диодами включалась быстро и с малым выбросом, необходимо минимизировать паразитные индуктивности в схеме.

Всего нескольких дюймов провода достаточно для того, чтобы паразитная индуктивность увеличилась, а «хороший» быстродействующий выпрямитель стал «плохим», с большим выбросом.

Одним из «диодов», который может включаться и выключаться действительно быстро, является переход транзистора. Диод, образованный из эмиттерного

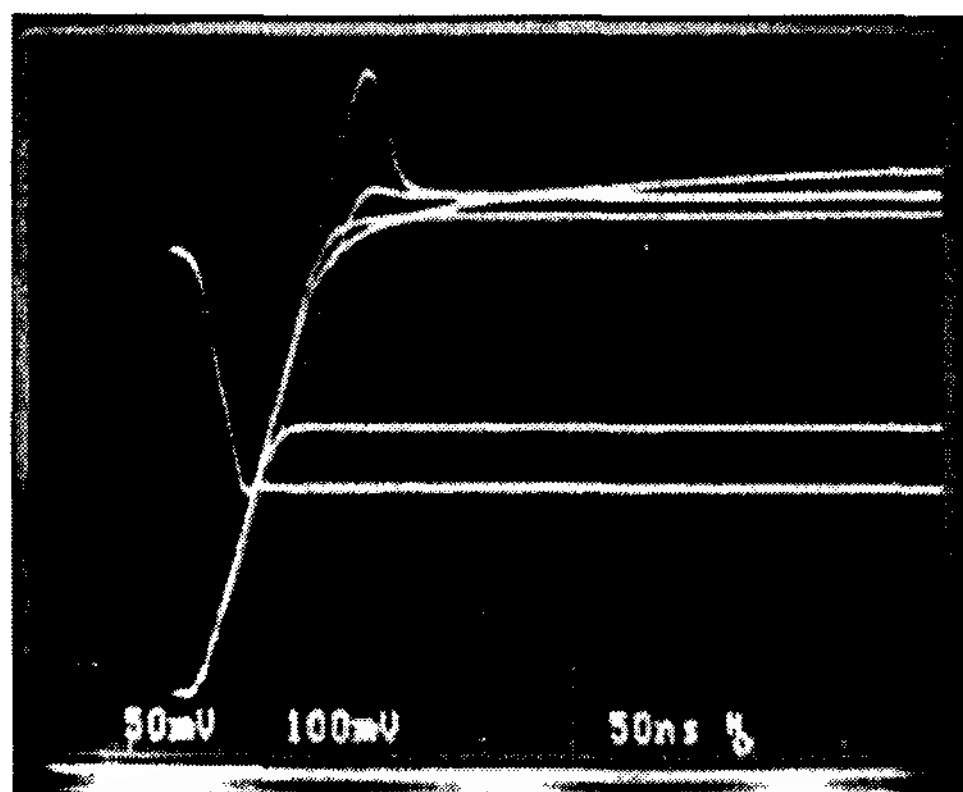
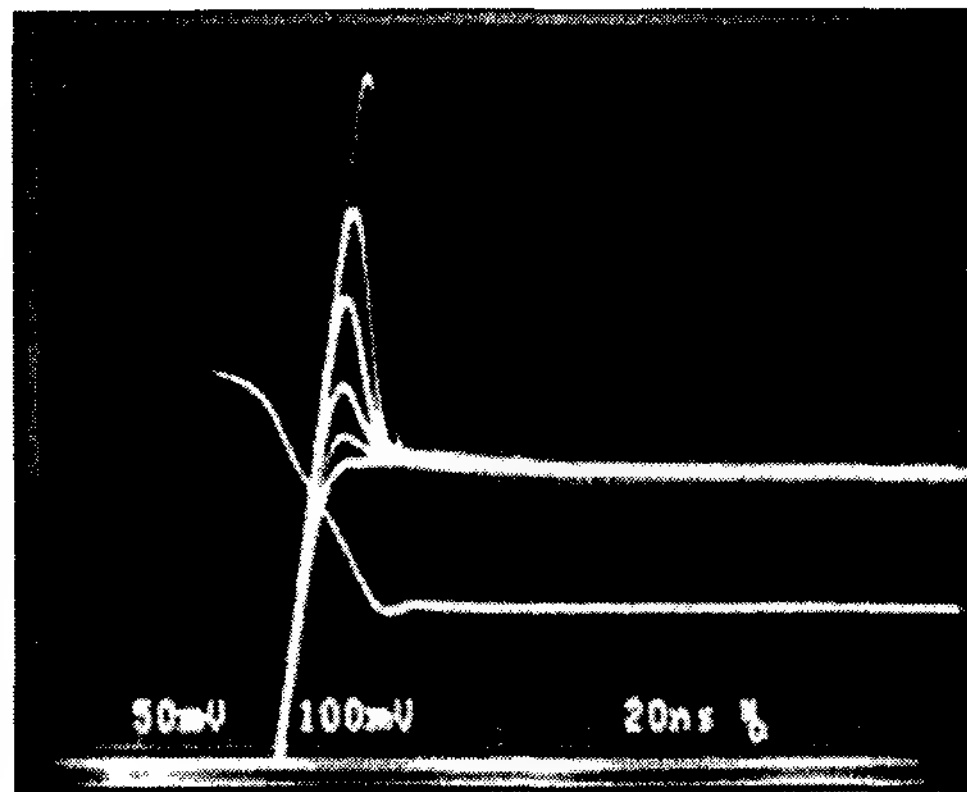
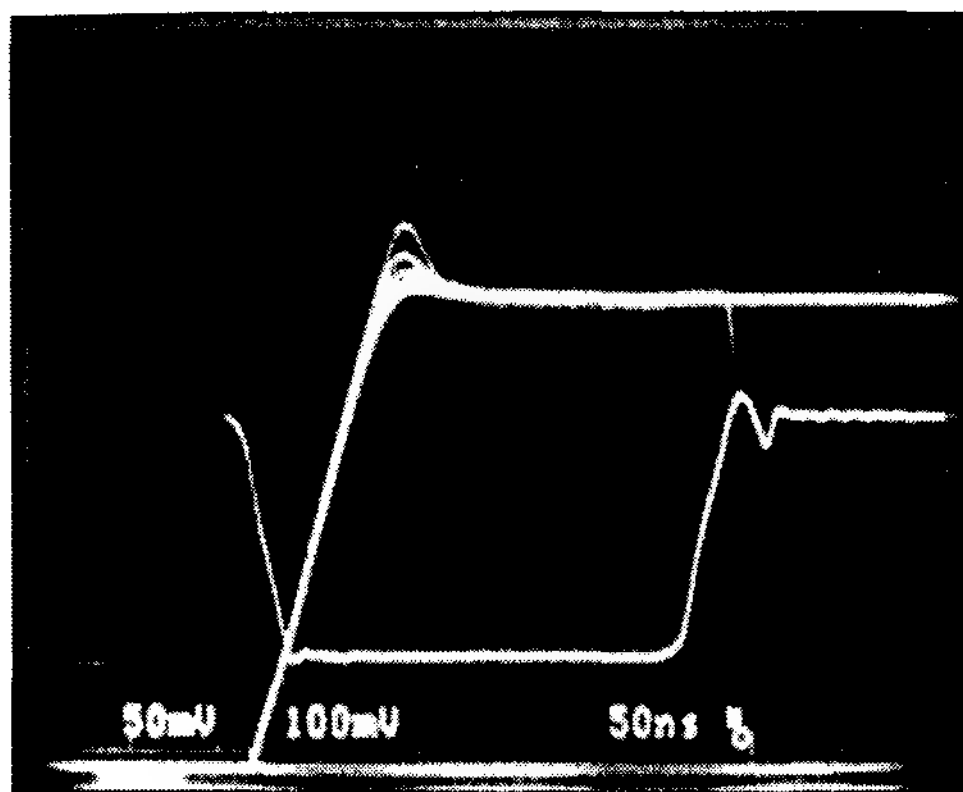
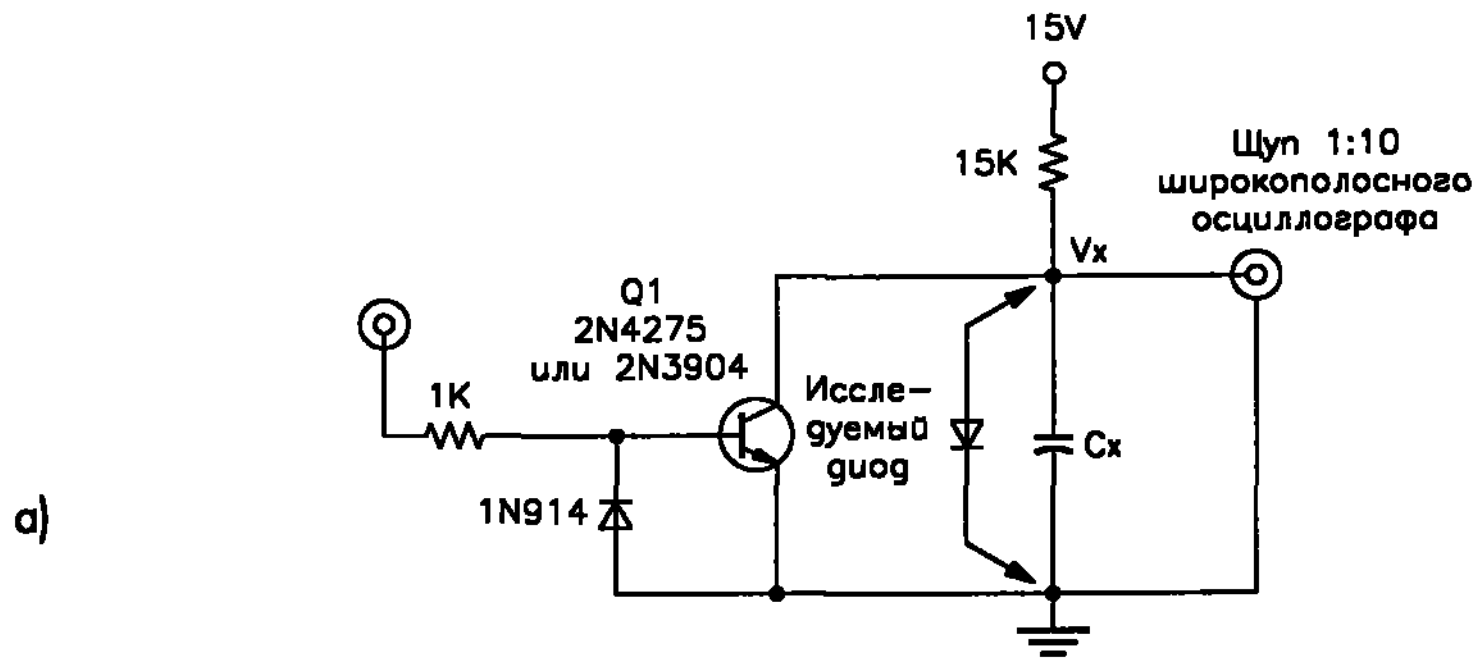


Рис. 6.2. Схема проверки диодов

Схема для испытания диодов (a). Транзистор Q_1 периодически уменьшает напряжение в точке V_x до уровня «земли». Когда этот транзистор закрывается, V_x нарастает приблизительно до 0,6 В. При этом напряжении диод начинает проводить ток. На рисунке (b) показано, что когда $dV_x/dt = 8 \text{ В/мкс}$, то до того, как диод 1N4148 откроется, выброс напряжения на нем при частоте входного сигнала ниже 10 кГц составляет 140 мВ. При более высоких частотах (120, 240, 480, 960 и 1920 кГц) по мере возрастания частоты повторения выброс уменьшается и исчезает. Выброс достигает максимальной амплитуды при $f_{in} < 7 \text{ кГц}$. На рисунке (c) показано, что, когда dV_x/dt возрастает до 20 В/мкс, выброс напряжения на том же самом 1N4148 при частоте

повторения 7 кГц составляет 450 мВ, при частоте 480 кГц – всего 90 мВ и пренебрежимо мал при частоте входного сигнала, превышающей 2 МГц (d). У диодов разных типов различные характеристики включения. Показанные вместе осциллограммы процессов включения (на частоте 120 кГц) для всех диодов не зависят от частоты, за исключением дефектного 1N4148.

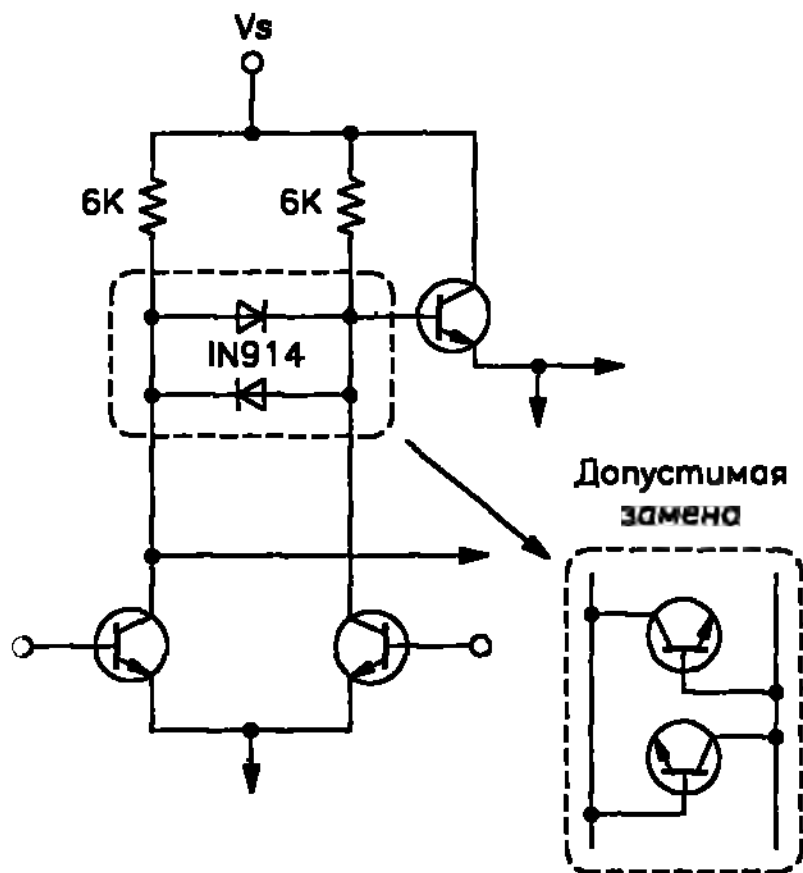


Рис. 6.3. Влияние диодов на схему

В первом каскаде этого операционного усилителя прямое или обратное напряжение на диодах не превышает уровня 1 мВ, однако сопротивление этих диодов гораздо меньше, чем выходное сопротивление первого каскада или входное сопротивление второго каскада (при высоких температурах). Поэтому коэффициент усиления катастрофически падает.

перехода обыкновенного 2N3904, может включаться и выключаться за 0,1 нс с пренебрежимо малым выбросом и утечкой, не превышающей 1 пА при обратном напряжении 1 В и не превышающей 10 пА при обратном напряжении 4 В. (База этого диода, естественно, соединена с коллектором.) Однако данный диод может выдержать обратное напряжение всего лишь 5 или 6 В, и в большинстве случаев эмиттерный переход начинает пробиваться уже при напряжении 6 или 8 В. Тем не менее, если в вашей схеме не используется большое напряжение, подобные транзисторы в диодном включении можно применять в качестве отличных быстродействующих диодов с малыми утечками. Их емкость лишь немного превышает емкость диода 1N914 – 1 пФ.

6.3. Особенности применения диодов

В темноте светодиод можно использовать в качестве диода с малой утечкой, что обусловлено большим напряжением запрещенной зоны материала, из которого он сделан. В таком включении у светодиодов наблюдается утечка, не превышающая 0,1 пА при прямом смещении 100 мВ или при обратном напряжении 1 В.

Вовсе не обязательно подавать на диод большое обратное напряжение для того, чтобы столкнуться с проблемой утечки. Проектируя гибридный операционный усилитель, я указал, что во избежание чрезмерной перегрузки диоды должны быть включены по обычной схеме, встречно-параллельно и параллельно входу второго каскада (рис. 6.3). Я больше не вспоминал об этих диодах до тех пор, пока мы не включили схему: усиление по напряжению операционного усилителя катастрофически падало при +125 °С. Почему? Это было вызвано использованием диодов типа 1N914, ток утечки в них возрастал с 10 нА при комнатной температуре до приблизительно 8 мкА при нагреве. Кроме того, не забывайте, что дифференциальное сопротивление диода при нулевом напряжении на нем приблизительно равно $(20-30 \text{ мСм/мА}) \times I_{\text{утечки}}$. Это означает, что в реальной схеме сопротивление каждого из двух диодов равно всего 6 кОм. Сопротивление на каждом входе

составляло всего 6 кОм, поэтому коэффициент усиления операционного усилителя падал в 4 раза, несмотря на то, что на диодах могло быть прямое или обратное напряжение всего в 1 мВ.

После того как вместо диодов мы применили коллекторные переходы транзисторов, требуемое значение коэффициента усиления восстановилось и пребывает таковым поныне.

Так что было бы опрометчиво предполагать, что диод при подаче на него нулевого напряжения имеет большое дифференциальное сопротивление, если у перехода этого диода большой ток насыщения. К примеру, при 25 °C и подаче на обычный диод типа 1N914 напряжения всего лишь в 1 мВ будет наблюдаться утечка в пределах 200–400 пА. Следовательно, 1N914 может оказаться неприемлемым – причем даже при комнатной температуре – для работы в схемах ограничения, привязки или фиксации уровня, и даже в качестве защитного диода в самых простых схемах, таких как цепь защиты входов для операционных усилителей с полевыми транзисторами во входном каскаде. И это при том, что на диоде практически не будет напряжения.

Как диод может отказать? Если по вашим предположениям диод должен включаться и выключаться, а вместо этого он делает что-то другое, то неожиданное поведение, возможно, не является следствием *отказа*, но наверняка приведет к *проблемам*.

Пойдем дальше. Диод можно вывести из строя, подав на него слишком большое обратное напряжение, не ограничив при этом ток или же допустив слишком большой прямой ток. При отказе диод чаще всего не разрывает цепь, а закорачивается, превращаясь в небольшой шарик переплавленного кремния. Как-то раз мне встретила партия диодов 1N4148, которые, подобно термостатам, размыкали цепь при 75 °C. Однако в настоящее время такие ситуации встречаются редко.

Один из самых простых способов «убить» диод – схема, в которой при включении питания через диод заряжается конденсатор слишком большой емкости. У многих выпрямителей ограничена сила тока, который может через него течь, при периодической или при однократной перегрузке. На меня всегда производили очень хорошее впечатление толстые книги компании Motorola (Phoenix, AZ), в которых приводились все графики областей максимальных режимов для прямых токов в зависимости от длительности импульсов и частоты их повторения. Поначалу с этими графиками разобраться непросто, но через некоторое время они становятся довольно удобным и полезным средством.

Производители диодов могут откалывать и другие штуки, не связанные с изменением технологического процесса. Если вы считаете, что «стрелка» диода (иногда называемая катодом) показывает в сторону цветного маркировочного кольца, а производитель разместил цветное кольцо с другой стороны корпуса диода, то схема будет работать не совсем правильно. К счастью, в наше время диоды с нестандартной маркировкой встречаются очень редко. Хотя я слышал, как один инженер назвал «стрелку» диода анодом, а это ведет к путанице и неразберихе.

Однажды я собрал прецизионный измерительный стенд, который работал идеально и давал исключительно точные показания, но до тех пор, пока я не поднял

его для того, чтобы посмотреть какие-то сигналы. После этого результаты измерения утечки стали *далеко* не нулевыми. Как только я поднимал устройство, показания приборов тут же менялись. Я уже начал подумывать, что изобрел альтиметр (высотомер). Потратив некоторое время на изучение, удалось выяснить, что источником неприятностей был диод FD300, который выпускается в прозрачном стеклянном корпусе DO-35, покрытом черной краской. Именно у этого экземпляра краска была слегка поцарапана, в результате чего, когда я поднимал прибор, свет попадал внутрь и засвечивал кристалл. Многие диоды этой серии не имеют подобных дефектов, так как вряд ли на большинстве из них процарапана краска.

Для того чтобы свести к минимуму вероятность возникновения проблем, сходных с описанными выше, я рекомендую действовать следующим образом:

- оценивать в самых сложных и важных устройствах возможность использования элементов, поставляемых каждым изготовителем;
- поддерживать с поставщиками хорошие отношения;
- настаивать на том, чтобы производители информировали вас, причем заранее, об изменении выпускаемой продукции;
- поддерживать отношения и с альтернативными поставщиками, занимающимися выпуском таких же элементов, и следить за качеством их продукции.

Мой босс может разгорчаться, если я буду говорить об этом слишком громко, однако хорошо известно, что лучше иметь два проверенных источника деталей, чем один. Аргументы типа «один поставщик лучше двух» я пропускаю мимо ушей. Могу еще согласиться, что иметь двух поставщиков, вероятно, лучше, чем семь или восемь, но одного – ничем не лучше, чем двух.

6.4. Стабилитроны

Практически любой диод будет пробит, если подать на него слишком большое обратное напряжение, однако стабилитроны *разработаны* именно для того, чтобы пробиваться вполне предсказуемым и определенным образом. Наиболее распространенная причина неприятностей со стабилитронами – работа в недонапряженном режиме. Если задать через стабилитрон недостаточный ток, то могут возникнуть шумы слишком большого уровня. На вольт-амперной характеристике многих стабилитронов есть четкий крутой излом в области малых обратных токов, но наличие такого излома при токах меньших, чем тот, для которого этот излом определен, не гарантировано. Некоторые стабилитроны не будут нормально работать даже при очень аккуратном их использовании.

В отличие от высоковольтных стабилитронов, низковольтные (рассчитанные на напряжение 3,3–4,7 В) не особенно хороши. Они сильно шумят, имеют малое дифференциальное сопротивление в рабочей области и плохой температурный коэффициент напряжения стабилизации – даже в случае работы на большом токе, достаточном для преодоления плавного излома. Это вызвано тем, что стабилитроны, рассчитанные на напряжение более 6 В, основаны на принципе самого настоящего лавинного пробоя, который коренным образом отличается от туннельного

(Зенеровского) пробоя (и превосходит по параметрам), то есть того, который используется в низковольтных стабилитронах – диодах Зенера. Для малых опорных напряжений широко используются источники, основанные на принципе напряжения запрещенной зоны, типа LM336 и LM385, так как у них рабочие характеристики лучше, чем у низковольтных стабилитронов.

Изготовители источников опорного напряжения типа 1N825, имеющих малый температурный коэффициент, гарантируют его небольшую величину только при рабочем токе, в данном случае равном 7,5 мА. Если ток стабилитрона больше или меньше, то иногда в такой ситуации можно подобрать нужный температурный коэффициент напряжения. Однако некоторые стабилитроны работают не очень хорошо, если ток отличается от того, на который они рассчитаны. Прецизионные стабилитроны 1N825 не следует проверять, чтобы определить, какое у них «рабочее напряжение». Так как в «рабочей полярности» встроенный термокомпенсирующий диод может быть пробит при напряжении 70–80 В, в результате чего он портится, снижается точность и надежность компонента и повышается уровень шумов.

Микросхема LM329 стала популярным источником опорного напряжения 6,9 В, в силу того что ее температурный коэффициент практически не зависит от рабочего тока, и функционировать она может на любом токе в пределах 1–10 мА. Микросхема LM399 еще более широко распространена, так как встроенный в устройство нагреватель поддерживает температуру перехода +85 °С. Вот почему его температурный коэффициент может быть в пределах 0,5–1 млн⁻¹/°С. Источники опорного напряжения типов LM329 и LM399 обладают также и хорошей долговременной стабильностью, обычно порядка 5–10 млн⁻¹ за 1000 ч. Используемая в микросхемах LM129/ LM199/ LM169 стабильность интегральных стабилизаторов со скрытым слоем также выше, чем у большинства дискретных источников опорного напряжения (1N825 или аналогичных) при их включениях и выключениях.

Прежде чем подвергнуть стабилитрон броску тока, проверьте графики зависимости максимально допустимой силы тока от времени, аналогичные графикам выпрямителей, о которых упоминалось выше. Эти графики покажут, что стабилитрон на напряжение 10 В мощностью 1 Вт нельзя использовать с рабочим током 1 А в течение длительного времени.

Фактически большинство выпрямительных диодов предназначены для использования строго в пределах указанных максимальных напряжений, и если вы будете настойчиво пытаться превысить допустимое обратное напряжение до уровня пробоя, то их надежность снизится. Снизить возможность ненадежной работы схемы можно, переделав ее так, чтобы избежать появления перегрузок по напряжению, или добавить поглощающую энергию демпферную цепь R-С диод, или использовать выпрямители, самовосстанавливающиеся после пробоя. Эти выпрямительные диоды сконструированы таким образом, чтобы выдерживать (безопасно и надежно) многократные переходы в состояние пробоя при превышении максимального рабочего напряжения. Обычно производители подобного рода элементов могут дать пару хороших советов по поводу того, как избежать проблем и неприятностей с ними.

Если нужен стабилитрон именно для работы с импульсами тока, обратите внимание на специально разработанные, рассчитанные на большие импульсные токи – также называемые *подавителями переходных импульсных помех* (transient voltage supressor), – выпускаемые фирмой General Semiconductor Industries Inc. (Tempe, AZ). Одноваттные приборы типов 1N5629 – 1N5665A могут выдерживать импульс тока лучше, чем большая часть 10- или 50-ваттных стабилитронов.

Если понадобился стабилитрон, который будет работать при действительно больших токах, то может выручить мощный транзистор (рис. 6.4). Как упоминалось выше, отказ диода при перегрузке обычно проявляется в виде короткого замыкания, а стабилитроны не могут поглотить столько энергии коротких импульсов, сколько вам хотелось бы. Это ужасно, но именно это свойство успешно используется разработчиками интегральных схем совершенно нестандартным образом.

Напряжение сдвига V_{OS} операционного усилителя обычно зависит от отношения сопротивлений нагрузки его первого каскада. Разработчики интегральных схем могут включать по несколько стабилитронов параллельно небольшим участкам резисторов нагрузки. При измерении V_{OS} можно определить, какой именно из стабилитронов следует закоротить – или *пережечь* – импульсом продолжительностью 5 мс тока силой 0,3–1,8 А. Стабилитрон быстро переходит в состояние с малым сопротивлением (около 1 Ом), в результате чего часть нагрузки закорачивается и V_{OS} улучшается.

В интегральной схеме LM108 фирма National Semiconductor впервые применила пережигание стабилитронов, несмотря на то что компания Precision Monolithics первой написала о пережигании стабилитронов, но стала использовать такой прием гораздо позже. Хотя пережигание стабилитронов – полезный прием, вы должны быть уверены, что никто никогда не пропустит мощный электростатический заряд через любой из контактов, подключенных к стабилитронам. Если вам нравится жечь стабилитроны с пользой и с прибылью, то вы, вероятно, знаете, что при пережигании таких диодов в темноте видны прелестные вспышки маленьких молний, поэтому, чтобы эти диоды не перегорели и не замкнулись, обходитесь с ними аккуратно.

Эти пережигаемые стабилитроны, называемые *вертикальными плавкими перемычками* или, более точно, *антиперемычками*, становятся популярными и для цифровых интегральных схем. Если разработчик интегральной микросхемы использует в качестве проводников силицид платины вместо металлизации алюминием, то диод «переживает» попытку выжигания.

6.5. Светодиоды

Как-то раз мне понадобилось 100 светодиодов, поэтому я купил 200 самых дешевых. Среди них я надеялся найти хорошие, а также слабо светящиеся или плохо функционирующие, которые я хотел бы использовать для проверки надежности работы системы в самых неблагоприятных случаях. Я просчитался: все 200 светили одинаково ярко. Одно из следствий закона Мерфи: бракованные запчасти, пригодные для использования в неблагоприятном случае, появляются только тогда, когда нужны исключительно качественные.

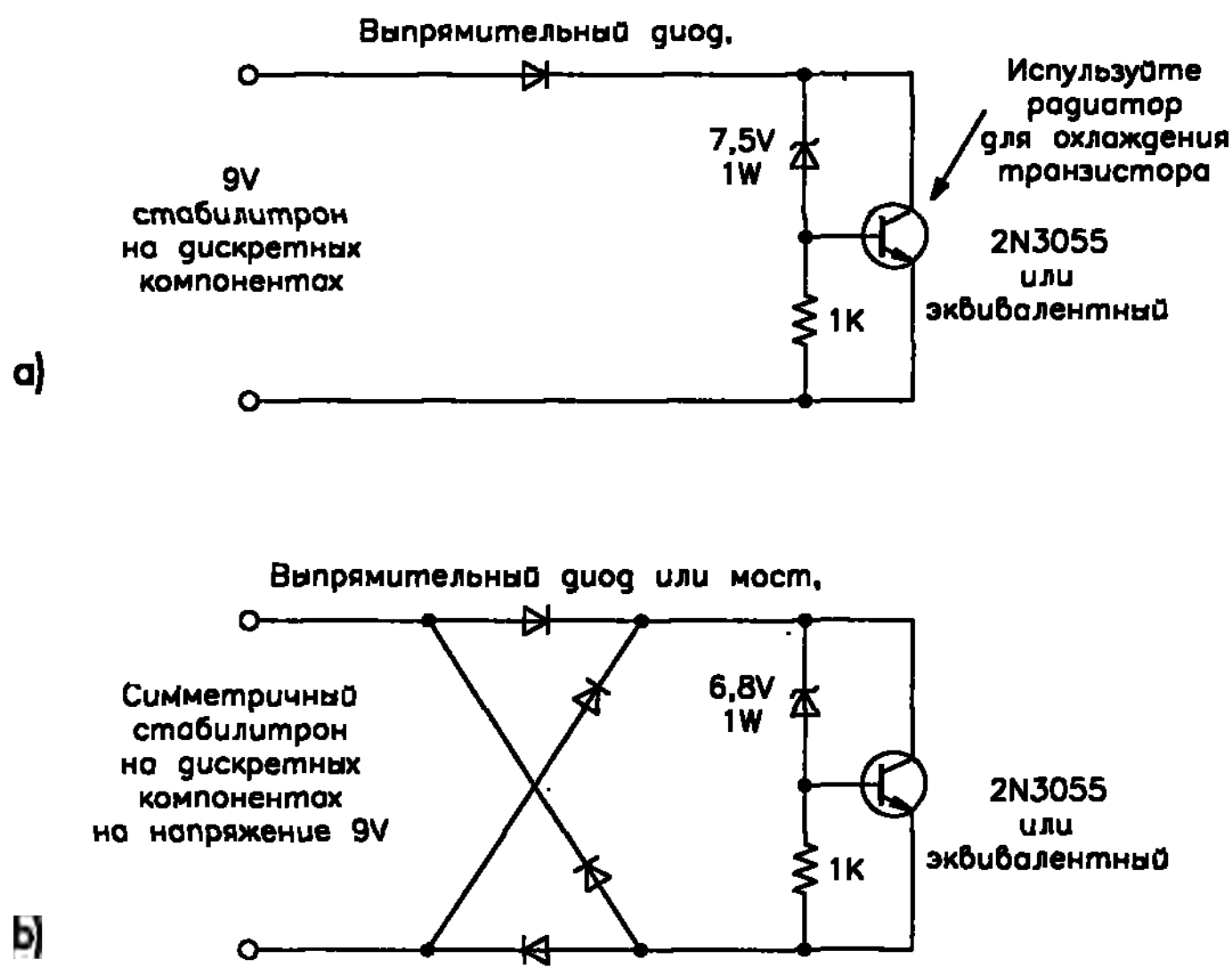


Рис. 6.4. Составные стабилитроны

Схема составного стабилитрона, номинальная мощность которого совпадает с номинальной мощностью силового транзистора (а). Практически такая же схема работает как симметричный согласованный двухвыводной составной стабилитрон (б).

В настоящее время практически любые светодиоды работают чрезвычайно надежно, до тех пор пока не перегреть их паяльником или слишком «большими миллиамперами» прямого тока.

У меня на стенке висел электронный термометр, в котором было использовано 650 дешевых светодиодов в пластмассовых корпусах. Статистически эти светодиоды наработали 40 000 000 часов всего с одним отказом. Единственная проблема, которая когда-либо возникала у меня со светодиодами, связана с попытками запомнить, какой из выводов «плюсовой». Чтобы выяснить это, я просто каждый раз прозваниваю светодиод.

6.6. Оптопары

Оптопары, называемые также оптронами или оптронными парами, обычно состоят из инфракрасного светодиода и фототранзистора, чувствительного к инфракрасному излучению. В ходе работ с дешевыми оптопарами типа 4N28 я обнаружил, что для получения приемлемых скоростей работы необходимо использовать специальное схемное решение. К примеру, если выполнять цепи смещения по схеме рис. 6.5, то можно добиться того, что 4N28 будет функционировать на частотах до 50 кГц, в противном случае устройство не сможет надежно срабатывать даже на частоте 4 кГц. Хитрость заключается в том, чтобы уменьшить время выключения фототранзистора, установив резистор между выводами 4 и 6.

Я перепробовал многие схемы с оптопарами этого типа и обнаружил, что импульсные характеристики системы могут изменяться в очень широких пределах. Общий коэффициент передачи, например при 8 мА, может быть в пределах 15–104%, несмотря на то что минимальное значение, указанное в технических характеристиках, равно 10%. Более того, эффективность светопередачи от светодиода фототранзистору изменялась больше чем в 10 раз от образца к образцу, а коэффициент β фототранзисторов «плавал» в пределах 300–3000. Следовательно, быстродействие транзистора, которое, безусловно, зависит от β и F_{3db} , также различалось больше чем в 10 раз.

Если ваша схема не способна работать в условиях, когда коэффициент передачи и быстродействие могут изменяться в столь широких пределах и столь непредсказуемым образом, то быть беде. Вот, например, две схемы, одна из которых – импульсный стабилизатор с оптопарой [3], а вторая – преобразователь сигналов «токовая петля» американского стандарта 4–20 мА [4]. Эти схемы обладают достаточной глубиной отрицательной обратной связи для того, чтобы любая из использованных оптопар типа 4N28 работала нормально. Раньше у меня всегда было несколько низкокачественных оптопар типа 4N28 разных поставщиков, которые я использовал для проверки макетов-прототипов и схем, требующих особой надежности. К сожалению, теперь у меня уже нет этих «приборов-маргиналов», но они были очень полезны.

Кроме того, в справочной литературе и в технических описаниях оптоэлектронных приборов редко встречаются четкие графики V_F или перечень типовых режимов работы в реальных условиях эксплуатации. В справочных листках указываются только максимально допустимые значения.

Следовательно, можно не заметить, что V_F светодиода в оптопаре на несколько сотен милливольт меньше, чем это же напряжение у обычного дискретного красного или инфракрасного светодиода. И наоборот, V_F красного светодиода повышенной

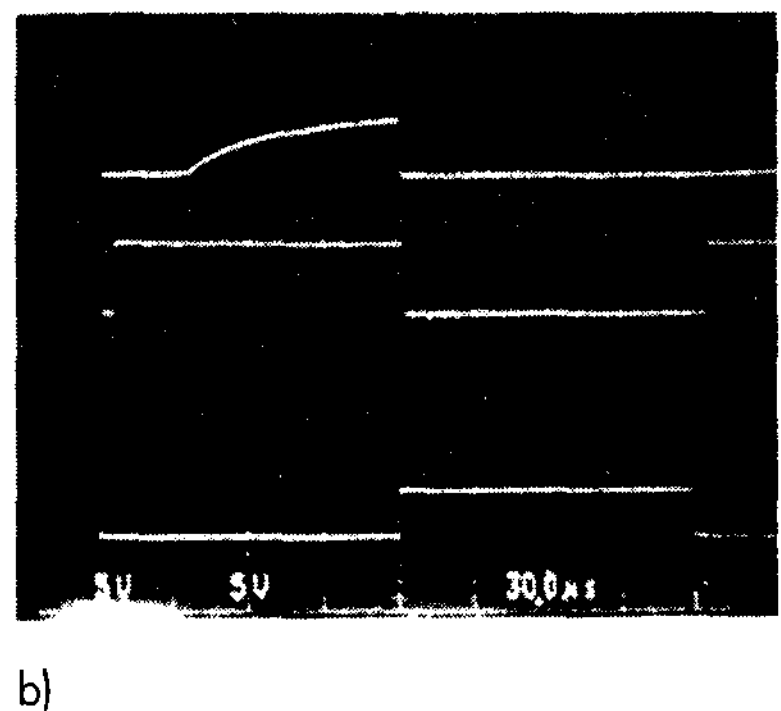
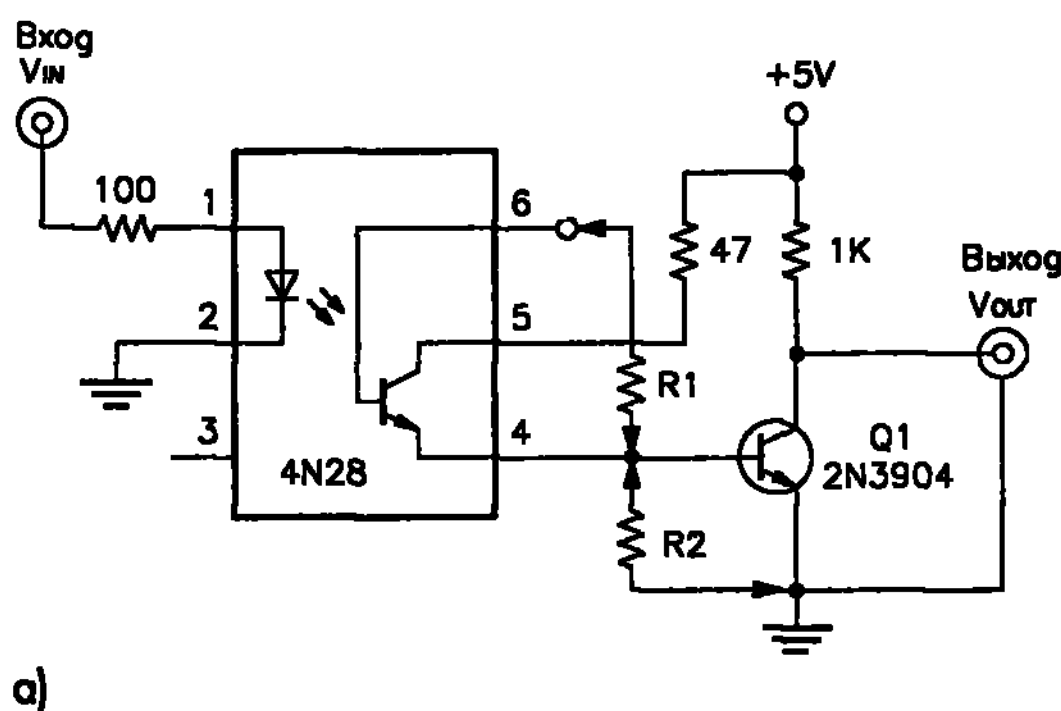


Рис. 6.5. Повышение быстродействия оптрона

Схема с дешевым оптроном типа 4N28 будет работать на более высокой частоте и с меньшей задержкой – 5 мкс вместо 60 мкс, если добавить резисторы R1 и R2. Нижняя осциллограмма (фото с экрана осциллографа) отражает форму входного сигнала, верхняя – выходной сигнал этой схемы без резисторов R1 и R2, а центральная – выходной сигнал при $R1 = 2 \text{ МОм}$, а $R2 = 1 \text{ кОм}$.

яркости или с высокой светоотдачей, как правило, на 150 мВ больше, чем V_F обычного красного светодиода (см. приложение Е). А вот V_F «трупа»¹ попросту не определено.

Как-то раз мне пришлось искать неисправности в нескольких модулях прерывателей. В них инфракрасный светодиод и фототранзистор были разделены воздушным промежутком. Таким образом, прерыватель – скажем, зуб шестеренки, – проходя через этот промежуток, может перекрывать световой поток. Я проверил один из модулей, закрыв транзистор листом бумаги, но ничего не произошло – транзистор оставался в открытом состоянии. Что же случилось в этот раз? Оказалось, что один лист бумаги может только рассеивать инфракрасное излучение, но не может перекрыть его полностью. Для того чтобы надежно перекрыть свет, нужно взять кусок тонкого картона или сложить вместе два листа бумаги.

6.7. Солнечные батареи

Поступающий извне нежелательный свет, попадающий на рп-переход полупроводника, – это лишь одна из многих замысловатых проблем, с которыми можно столкнуться, если начать разрабатывать и отлаживать прецизионный усилитель, особенно если он имеет большое входное сопротивление. Подобно рп-переходу диода, переход коллектор-база транзистора может служить отличным фотодиодом, но обычно свет надежно блокируется пластмассовым, керамическим или металлическим корпусом элемента.

Когда свет попадает на рп-переход любого диода, световая энергия преобразуется в электрическую и диод «сам на себя» подает прямое напряжение. Если к выводам диода подключить нагрузку, то можно получить от диода полезные напряжение и ток. К примеру, соединив последовательно несколько диодов с большой площадью кристаллов, их используют для перезарядки аккумуляторов. Самым ненадежным звеном в такой системе является батарея. Даже если всегда обращаться с аккумуляторами осторожно, они не выдерживают много циклов заряд-разряд, и в конце концов батарея теряет способность накапливать заряд. Сейчас в печати полно дифирамбов электромобилям, работающим на аккумуляторах, но авторы этих материалов постоянно забывают о невероятной дороговизне как самих аккумуляторов, так и их обслуживания. А замена аккумулятора понадобится всего через несколько сотен циклов заряд-разряд. Кажется, приверженцы электромобилей решили, что если не обращать внимания на эту проблему, то все как-нибудь само собой образуется...

О солнечных батареях говорят тоже много. Наиболее важная проблема, затрудняющая использование солнечных батарей, связана с разработкой корпусов для них. Большинство полупроводников недолго выдерживают эксплуатацию под прямым солнечным светом и под дождем, а солнечные батареи работают именно в таких условиях. Сделать надежный корпус очень непросто, учитывая, что для солнечных батарей основным требованием является низкая себестоимость.

¹ В оригинале: DEAD – Darkness Emitting Arsenide Diode – «излучающий темноту арсенид-галлиевый диод», то есть неработающий светодиод. – Прим. переводчика.

С солнечными батареями связана еще одна проблема – различные температурные зависимости параметров фотоэлементов. Как и у всякого диода, V_F элемента солнечной батареи падает по мере роста температуры с коэффициентом $2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$. Таким образом, при увеличении интенсивности солнечного света, попадающего на солнечную батарею, может увеличиваться и вырабатываемый ею ток. Однако при этом напряжение, генерируемое солнечной батареей, может стать ниже напряжения аккумулятора, после чего заряд его прекратится. Использование отражательных коллекторов для того, чтобы увеличить интенсивность света, падающего на каждый элемент солнечной батареи, лишь усиливает проблему с температурными коэффициентами. Принудительное охлаждение могло бы помочь, но сложность и дороговизна подобной системы сведет на нет первоначальное преимущество простоты конструкции солнечных батарей.



Рис. 6.6. В ясную погоду с помощью солнечной батареи можно получить электричество

6.8. Батареи и аккумуляторы

И наконец, я хотел бы посвятить несколько слов батареям и аккумуляторам. Единственное, чем они напоминают диоды, – количеством выводов. У батарей их тоже два. Аккумулятор представляет собой сложное электрохимическое устройство, и многие толстые книги посвящены описанию характеристик аккумуляторов различных типов [5–10].

Я не буду приводить здесь полное и подробное описание аккумулятора. Вместо этого вкратце расскажу об основных способах разрешения возникающих с ними проблем.

Прежде всего всегда обращайтесь к техническим описаниям, выпускаемым изготовителями для того, чтобы выяснить, какая нагрузка является оптимальной для данного аккумулятора и какого цикла перезаряда следует придерживаться для того, чтобы батарея прослужила как можно дольше. При заряде никель-кадмиевой батареи необходимо поддерживать постоянным ток заряда, а не напряжение. А после того, как батарея будет заряжена практически полностью, следует убедиться в том, что эта несчастная маленькая вещица не нагрелась. Тепло – враг аккумуляторов, как и полупроводников. Если вы подвергаете аккумулятор циклам с полным разрядом, то посмотрите, что сказано по этому поводу в технической документации и в руководстве по эксплуатации. Некоторые специалисты советуют разряжать батарею полностью, до нуля, другие считают, что при полном

разряде отдельные элементы батареи разряжаются быстрее других, после чего они оказываются переполюсованы. Я не знаю, какая точка зрения более правильная.

Иногда в никель-кадмиевых аккумуляторах может произойти внутреннее короткое замыкание. Если подобное несчастье случилось, когда батарея слабо заряжена, то замыкание в батарее может сохраняться до тех пор, пока вы не «жахнете» по ней коротким мощным импульсом тока. Я выяснил, что разряд конденсатора емкостью 470 мкФ, заряженного до напряжения 12 В, отлично «прочищает» замкнутый элемент. Если конденсатор емкостью 470 мкФ не справляется, то я беру конденсатор емкостью 3800 мкФ.

Свинцово-кислотную батарею необходимо заряжать так, чтобы без нагрузки напряжение на каждом элементе составляло 2,33 В. При повышенной температуре это напряжение нужно снижать из расчета 6 мВ/°С. Не забудьте заглянуть в рекомендации изготовителя. Если свинцово-кислотный аккумулятор сильно разрядится (напряжение на элемент менее 1,8 В), его необходимо немедленно перезарядить, так как в противном случае долговечность снизится по причине сульфатации пластин.

Во время работы аккумулятора с избыточным током разряда следует соблюдать осторожность, так как даже хорошие и мощные батареи часто перегреваются, а иногда и взрываются. Будьте также внимательны при заряде таких батарей, опасайтесь накопления водорода и других газов, потенциально опасных для здоровья.

И, пожалуйста, ликвидируйте все отработанные батареи так, чтобы не наносить вреда окружающей среде.

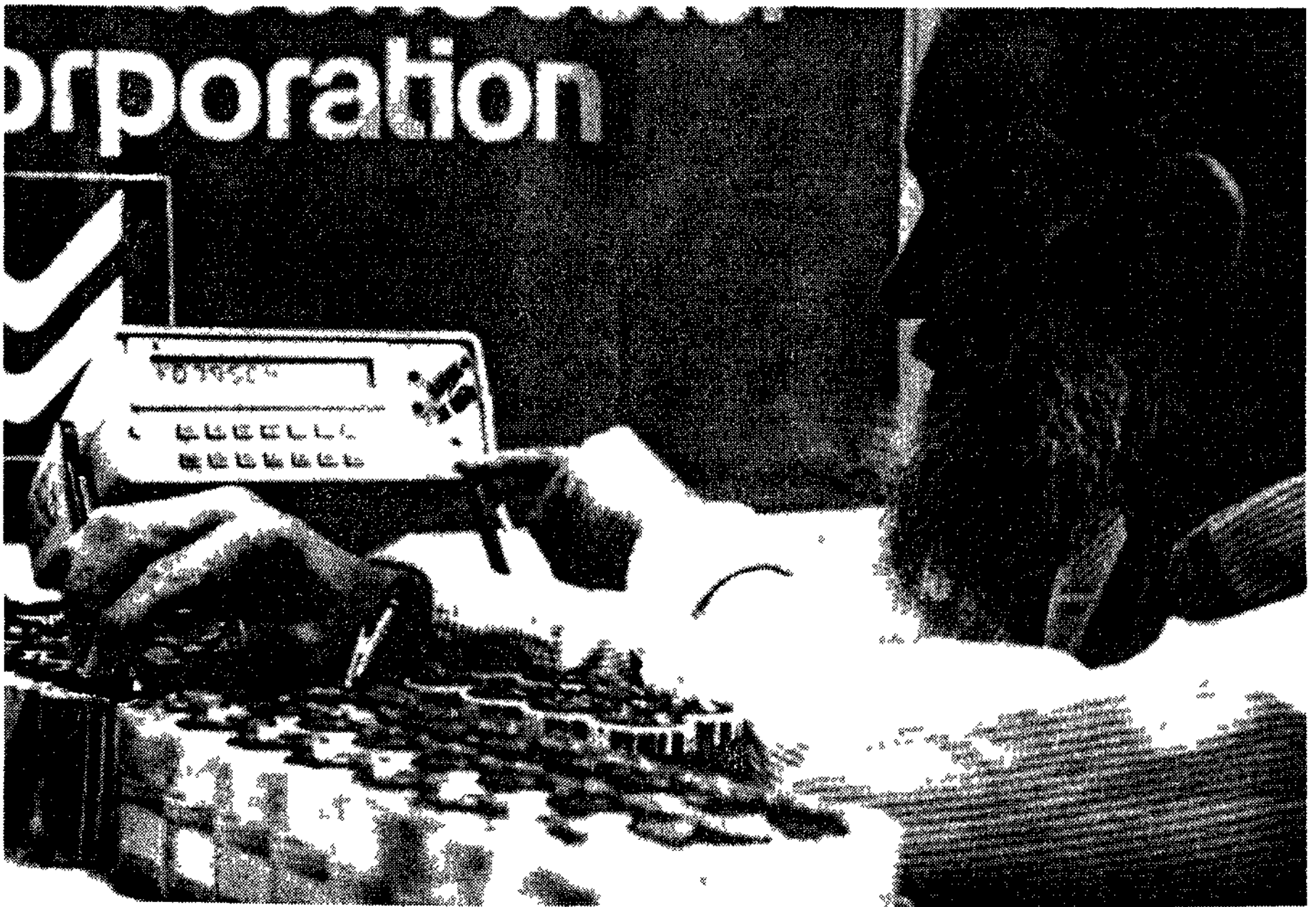


Рис. 6.7. Для поддержания аккумулятора в работоспособном состоянии особое внимание следует уделять процессам заряда, разряда и его температуре

Литература

1. Pease, Robert A., "Bounding, clamping techniques improve on performance", *EDN*, November 10, 1983, c. 277.
2. Pease, Bob и Maddox, "The Subtleties of Settling Time", *The New Lightning Empiricist*, Teledyne Philbrick, Dedham MA, June 1971.
3. Pease, Robert A., "Feedback provides regulator isolation", *EDN*, November 24, 1983, c. 195.
4. Pease, Robert A., "Simple circuit detects loss of 4–20 mA signal", *Instruments & Control Systems*, March 1982, c. 85.
5. *Eveready Ni-Cad Battery Handbook*, Eveready, Battery Products Div., 39 Old Ridgebury Rd., Danbury, CT. (203) 794–2000.
6. *Battery Application Manual*, Gates Energy Products, Box 861, Gainesville, FL 32602. (1–800–627–1700)¹.
7. Perez, Richard, *The Complete Battery Book*, Tab Books, Blue Ridge Summit, PA, 1985.
8. Small, Charles H., "Backup batteries", *EDN*, October 30, 1986, c. 123.
9. Linden, David, Editor-in-Chief, *The Handbook of Batteries and Fuel Cells*, McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1984².
10. Independent Battery Manufacturers Association, *SLIG System Buyer's Guide*, 100 Larchwood Dr., Largo, FL 33540. (830) 356–1408³.

¹ Это руководство по герметизированным свинцово-кислотным и никель-кадмиевыми аккумуляторам.

² Библия для каждого, кто работает с батареями и аккумуляторами

³ Эта книга – лучшее руководство по свинцово-кислотным аккумуляторам.

7. ТРАНЗИСТОРЫ: НЕИСПРАВНОСТИ И ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

С транзисторами – биполярными, полевыми или МОП – больших проблем нет, однако неприятности иногда возникают. Использование строго определенных методов проектирования и соответствующие представления о том, каковы особенности работы транзисторов в конкретных схемах, наверняка позволят вам избежать многих неприятностей.

Универсальность и гибкость транзисторов вызывают восхищение. Имея в распоряжении несколько транзисторов, можно построить практически любую высокочастотную схему: быстродействующий операционный усилитель, усилитель-распределитель видеосигналов или уникальную логическую схему.

При этом надо помнить, что транзисторы иногда подводят. К примеру, обычный усилитель, скорее всего, выйдет из строя, если вы подадите напряжение питания на вход либо закоротите на землю выход. К счастью, в большей части операционных усилителей предусмотрены средства защиты от подобных ошибок и интегральным микросхемам такие неприятности не страшны. При разработке операционных усилителей $\mu A741$ и LM101 было использовано избыточное количество транзисторов для того, чтобы гарантировать, что их входные и выходные каскады смогут выдержать подобное варварское обращение. Однако и сами транзисторы могут быть повреждены, если на их входе будет течь слишком большой прямой или обратный ток, кроме того, практически каждый транзистор может попросту расплавиться. Так что от нас, инженеров, требуется разрабатывать схемы на транзисторах таким образом, чтобы они не взрывались. И чинить эти схемы – когда это произойдет – тоже придется нам.

Простая, но не всегда очевидная проблема может быть заключена в неправильной установке транзистора на плату. Так как у транзистора три вывода, то возможных вариантов неправильной установки гораздо больше, чем для диода. Малосигнальные транзисторы часто устанавливают настолько близко к поверхности печатной платы, что невозможно проверить, не перекрещены ли выводы транзистора и не

замкнут ли какой-нибудь из выводов на корпус транзистора или на дорожку платы. На практике мне встречались изделия, на которых перепутаны выводы деталей, и приблизительно каждый десятый транзистор был не того типа: там, где должен был находиться pnp-транзистор, был установлен npn, и наоборот. Я много думал, но так и не смог придумать какую-нибудь схему, которая работала бы одинаково хорошо, вне зависимости от того, какого «пола» транзистор в ней установлен (того типа проводимости, что требуется, или другого). Так что следите за своими P и Q, P и N, 2N1302 и 2N1303C, 2N3904 и 2N3906.

Нужно не только правильно монтировать транзисторы, но и грамотно разрабатывать схемы, в которых они используются. Прежде всего им необходима защита входных цепей, за исключением того случая, когда транзисторы полностью защищены от всего внешнего мира. Большая часть транзисторов может выдержать десятки миллиампер прямого тока базы, но они «умрут», если вы подадите на базу «всего несколько вольт» прямого напряжения. Добавление защитных элементов — один из моих любимых коньков. В технических требованиях на оборудование военного назначения MIL-HDBK-217 неизменно отмечается, что надежность схемы падает при увеличении числа элементов в ней. Однако практика показывает: если вы добавляете резисторы или транзисторы для того, чтобы защитить входной или выходной каскады усилителя, то надежность схемы возрастает. Из этого примера следует: нельзя верить всему, что можно вычитать из технических требований на оборудование для министерства обороны. Детальный критический разбор способов расчета надежности, представленных в стандарте MIL-HDBK-217, приведен в специальной литературе [1].

Аналогичным образом, если вы будете отбирать ток из базы транзистора, переход база-эмиттер будет «пробит», именно такой пробой называется *туннельным*, *Зенеровым* или *Зенеровским*. Обратный ток — даже если он не превышает нескольких наноампер или присутствует лишь очень короткое время — обычно, в лучшем случае на некоторое время, снижает коэффициент передачи тока транзистора в режиме малого сигнала. Так что в случаях, когда особенно важна точность, изыщите способ исключить появление обратного тока во входных цепях транзистора. Боб Видлар напоминал мне, что пробой такого типа обычно не влияет на коэффициент передачи тока транзистора в режиме большого сигнала, так что если, например, в импульсном стабилизаторе долбить по базе транзистора обратным V_{EB} , то вовсе не обязательно, что это каким-либо образом повлияет на работу схемы или ухудшит параметры транзистора для режима большого сигнала.

Кроме того, транзисторы чувствительны к электростатическим разрядам. Если вы в сухую погоду пройдетесь по ковру, накопите заряд в несколько тысяч вольт, а затем пальцем прикоснетесь к базе pnp-транзистора, то, возможно транзистору ничего не будет, так как переход может выдержать импульс прямого тока силой до нескольких ампер, если он длится доли микросекунды. Не прикасайтесь к эмиттеру pnp-транзистора, база которого заземлена, или к базе npn-транзистора, так как велика вероятность появления обратного напряжения на эмиттерном переходе, что может существенно повредить переход, а маломощный транзистор, скорее всего, полностью вывести из строя.

При разработке интегральных схем опытные инженеры используют специальные защитные диоды так, чтобы схема могла выдержать положительный или отрицательный электростатический разряд с напряжением 2000 В на любом из выводов. Большинство выводов у современных микросхем могут выдержать в 2–3 раза более мощный разряд. Эти критерии защиты от электростатического разряда основаны на модели человеческого тела, полное сопротивление которой представляет собой цепь, составленную из последовательно соединенных конденсатора емкостью 100 пФ и резистора сопротивлением 1500 Ом. Для дискретных транзисторов, переходы которых гораздо больше, чем те, которые используются в интегральных микросхемах, электростатический разряд может оказаться не так опасен. Тем не менее в ряде случаев повреждение от электростатического разряда не исключено. Малосигнальные ВЧ транзисторы (к примеру, серий 2N918, 2N4275 и 2N2369) иногда выходят из строя после того, как «на них посмотрят», потому что переходы у этих транзисторов очень «маленькие».

Остальные проблемы, связанные с транзисторами, возникают, если выбирать конструктивные допуски бездумно. Каждый новичок знает, что V_{BE} транзистора снижается приблизительно на 2 мВ при повышении температуры на 1 °С и повышается приблизительно на 60 мВ при увеличении силы тока на декаду. Не следует оценивать величину напряжения V_{BE} транзисторов поспешно. К примеру, не стоит надеяться, что с большой точностью будут совпадать величины V_{BE} у двух транзисторов, расположенных близко друг от друга, или если их окружают источники тепла и напряжения, или рядом проносятся потоки холодного или горячего воздуха. Для того чтобы характеристики подобранных в пары транзисторов точнее совпадали, их необходимо склеивать вместе. *Наиболее полное* совпадение характеристик дает, безусловно, применение интегральных сдвоенных транзисторов типа LM394.

Мне известны случаи, когда были получены патенты на схемы, которые никогда не работали, так как их разработчики основывались на неправильном понимании того, как связаны V_{BE} и ток эмиттера. Неверно считать, что два подобранных транзистора с одинаковым V_{BE} при одном и том же токе малой величины будут иметь одинаковый температурный коэффициент. Но вы же не станете делать необдуманные предположения, если эти два транзистора были поставлены разными производителями либо одним, но в разное время. Точно так же, как и V_{EB} , транзисторы разных производителей будут иметь различные характеристики при переходе в режим насыщения или при выходе из него (режим большого сигнала, или ключевой режим), особенно если транзисторы работают на высокой частоте.

Еще одно допущение, которое приходится делать инженерам-разработчикам, относится к тому, что произойдет при отказе транзистора. Очень часто говорят, что во время отказа транзистор, подобно диоду, либо работает в режиме короткого замыкания, либо превращается в низкоомное сопротивление. Однако, в отличие от диода, кристалл транзистора обычно разварен на выводы корпуса микропроводами, поэтому при достаточной мощности источника питания короткое замыкание в кристалле транзистора приведет к тому, что по микропроводам пойдет большой ток, который их попросту испарит. Как только эти микропровода перегорят, транзистор окончательно откажет и разомкнет цепь.

7.1. Коэффициент передачи

При проектировании схем лучше применять транзисторы, обладающие высоким коэффициентом передачи β . Однако, как чаще всего бывает, лучшее – враг хорошего. Один из h -параметров (h_{rb}) равен $\Delta V_{BE} / \Delta V_{CB}$ в режиме с общей базой. Многие инженеры выучили, что если β растет, то растет и h_{rb} .

По мере роста β и соответственно h_{rb} снижается выходное сопротивление транзистора, падает напряжение Эрли, уменьшается коэффициент усиления по напряжению, а также может снизиться напряжение пробоя V_{CEO} в режиме с общим эмиттером. (Под напряжением Эрли транзистора понимается такая величина V_{CE} , которая при неизменном токе базы вызывает примерно двукратное увеличение тока в коллекторе по отношению к тому значению, которое этот ток имел при малом напряжении.) Величина V_{Early} приблизительно равна $26 \text{ мВ} \times (1 / h_{rb})$. Из этого следует, что во многих схемах есть такая рабочая точка, в которой увеличение β *не повышает, а снижает* коэффициент усиления.

Другой способ эффективного увеличения β заключается в использовании составных транзисторов или схем Дарлингтона, однако при этом могут ухудшиться усиление по напряжению и шумовые свойства, на частотной характеристике может образоваться «горб», а базовый ток может уменьшиться весьма незначительно. Будучи начинающим инженером, я изучал способы, которыми фирма Tektronix добилаcь эффективного использования ламп и транзисторов в своих осциллографах, в основных блоках и в сменных модулях. Инженеры Tektronix мало использовали схемы Дарлингтона. До сих пор я узнаю все новые и новые аргументы в пользу того, чтобы не использовать составные транзисторы или многокаскадные повторители. Долгие годы было важнее (в подавляющем большинстве схем) добиться согласованных, а не заоблачных значений β . Можно самому заниматься подбором транзисторов с согласованными β , использовать интегральные спаренные идентичные транзисторы типа LM394, а кроме того, применять интегральные транзисторные сборки, содержащие по четыре или пять идентичных транзисторов на одном кристалле, например микросхемы типов LM3045 и LM3086.

Одной из положительных черт биполярных транзисторов является то, что крутизна их характеристики g_m абсолютно предсказуема. При комнатной температуре $g_m = 38,6 \times I_C$ (Это гораздо более четкое соотношение, чем формула для проводимости диода при прямом смещении, о которой рассказывалось в предыдущей главе.) Коэффициент усиления по напряжению определяется по формуле $A_v = g_m \times Z_L$, так что его вычисление обычно является тривиальной задачей. В ряде случаев может понадобиться корректировка этой простой формулы. Например, если подключить к эмиттеру резистор местной обратной связи R_e , то эффективная крутизна характеристики уменьшится до значения, соответствующего $1 / (R_e + g_m^{-1})$. Кроме того, величина A_v чувствительна к колебаниям температуры и изменениям напряжения смещения или тока эмиттера, а также этот коэффициент зависит от паразитных сопротивлений, включенных параллельно нагрузке, и от конечно-го выходного сопротивления транзистора. Не забывайте: элементы с большой величиной коэффициента передачи тока могут иметь *значительно* меньшее выходное сопротивление, чем транзисторы со средним значением β .

Также учитывайте, что, хотя крутизна характеристики биполярного транзистора, режим которого выбран правильно, достаточно точно предсказуема, коэффициент передачи тока β может изменяться в широком диапазоне и не может быть предсказан с такой же точностью. Так что придется следить за неблагоприятными отклонениями режима системы в случаях, когда β будет либо чрезмерно большим, либо малым, вызывая изменения положения рабочих точек и напряжений смещения.

7.2. Полевые транзисторы

При заданном рабочем токе значение g_m у полевых транзисторов обычно гораздо ниже, чем у биполярных. Для того чтобы увидеть, на сколько ниже, придется измерить параметры имеющихся в наличии транзисторов. Помимо этого напряжение V_{GS} полевых транзисторов может изменяться в широких пределах, что значительно осложняет выбор для них режима смещения, в отличие от биполярных.

Полевые транзисторы с рп-переходом стали широко применяться лет 20 назад, так как это дало возможность создавать аналоговые ключи с сопротивлением, не превышающим 30 Ом, и высококачественные операционные усилители, у которых, по крайней мере при средних и низких температурах, входные токи ниже, чем у приборов на биполярных транзисторах.

Благодаря появлению технологии BiFET¹ (изготовление комбинированных ИС на биполярных и полевых транзисторах) стало возможно одновременное размещение полевых транзисторов с рп-переходом и биполярных транзисторов на одном кристалле микросхемы. Необходимо отметить, что температурный коэффициент V_{OS} , долговременная стабильность и напряжение шумов даже у лучших входных каскадов, изготовленных по технологии BiFET, все еще уступают аналогичным параметрам устройств на биполярных транзисторах. Однако у микросхем BiFET есть преимущество – малые входные токи в нормальных условиях.

Если у полевого транзистора с рп-переходом ток истока (называемый I_{gss}) не нулевой, то ток затвора этого транзистора может быть больше, чем в том случае, когда ток истока отсутствует. 20 лет назад, когда я обнаружил это явление и обсудил его с Джоэлом Коуэном (Joel Cohen) из компании Crystalonics, мы назвали его эффектом Пиза-Коуэна. Я считал, что этот эффект вызывается несовершенством омических контактов, но другим инженерам удалось показать, что на самом деле причина его – ударная ионизация, или «горячие носители». В любом случае наблюдается тенденция увеличения тока затвора в линейной зависимости от тока истока и в экспоненциальной при больших напряжениях между стоком и истоком транзистора.

Работая с гибридной схемой, в которой использовалось несколько полевых транзисторов с рп-переходом, где в качестве выводов затворов предполагалось использовать нижнюю сторону кристаллов транзисторов, я обнаружил, что некоторые технологические операции при изготовлении части кристаллов были не

¹ Зарегистрированная торговая марка корпорации National Semiconductor.

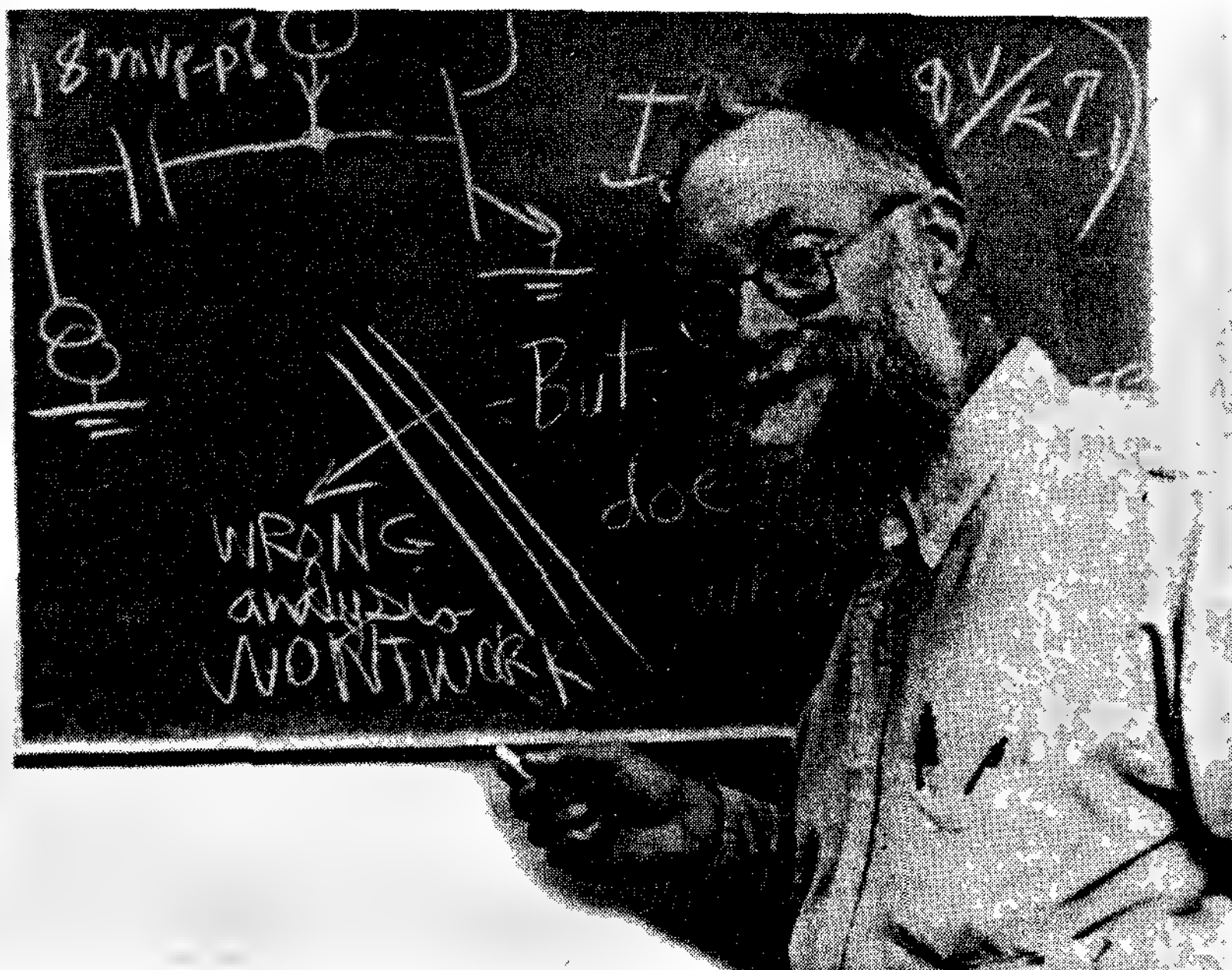


Рис. 7.1. Уравнения, описывающие схемы, помогают разобраться в проблеме

совсем корректны. Это привело к тому, что транзисторы функционировали несколько странно. Сначала затворы работали так, будто они действительно были соединены со слоем металла на нижней стороне транзистора, и обычно это продолжалось довольно долго. Но через некоторое время после этого создавалось впечатление, что на их месте цепь была разорвана. При этом разность напряжений между собственно затвором и нижней частью кристалла достигала 1 В, а V_{OS} усилителя вырастало до 1 В! Затвор оставался разомкнутым еще неделю, пока какой-то импульс напряжения не восстанавливал контакт! Периодичность происходящего сбивала с толку, так как не было ничего, что могло бы сократить длительность недельного цикла наработки на отказ. В результате пришлось начать все заново и добавить проводники, ведущие к расположенным в верхней части кристалла контактным площадкам затворов. А нам говорили, что без этого можно будет обойтись. Вот так-то!

При разработке гибридных схем следует помнить, что на подложку кристаллов необходимо обязательно подавать строго определенное постоянное напряжение. Подложка полевого транзистора обычно соединена с его затвором, но это соединение может иметь большое и не определенное точно сопротивление. Нужно быть квалифицированным химиком или технологом, чтобы иметь уверенность в том, что для получения надежного соединения с затвором нет необходимости использовать дополнительные проводники, которые ведут к контактной площадке затвора на слое металлизации, расположенной на верхней части транзистора.

Подложка кристалла дискретного биполярного транзистора обычно является коллектором. В большинстве линейных и цифровых интегральных микросхем

подложка кристалла подключается к отрицательному полюсу источника питания. Из этого правила есть исключения, к числу которых относятся регулируемые интегральные стабилизаторы положительного напряжения серии LM117 и им подобные, – у них подложка соединена с шиной V_{out} . Положительное напряжение питания $+V_s$ подается на подложки интегральных стабилизаторов напряжения серии LM196, цифровых микросхем семейств MM74HC00, NSC LMC660 LPC660, а также на подложки большей части выпускаемых компанией Harris операционных усилителей с полной изоляцией элементов диэлектриком.

Таким образом, нужно всегда учитывать, что именно подключено к подложкам интегральных микросхем. Если случится так, что металлический корпус операционного усилителя LM101АН замкнет на общий провод или на положительный полюс питания $+V_s$, то будут проблемы. Нельзя также допускать замыкания корпуса операционного усилителя HA2525 на землю или на шину $-V_s$.

МОП транзисторы широко применяются в цифровых интегральных схемах и, кроме того, в аналоговой схемотехнике, к примеру аналоговых ключах. Счетверенные ключи типа CD4016 и CD4066 приобрели популярность благодаря низкому уровню утечек и невысокой цене. Операционные усилители, на входе которых использованы такие транзисторы, завоевывают все новые позиции на рынке операционных усилителей общего назначения. Репутацию МОП транзисторам обычно портил чрезмерный уровень шумов, однако новые образцы интегральных микросхем, к примеру сдвоенный операционный усилитель LMC662, показывают, что контроль чистоты производства позволяет успешно бороться с этим недостатком, в результате чего МОП транзисторы могут конкурировать с микросхемами, выполненными по технологии BiFET. Их применение дает тысячекратный выигрыш по входному току – он снижен с 10 пА до 10 фА. Следует особо оберегать выводы входов от электростатических разрядов. У большей части интегральных схем, использующих на входе МОП транзисторы, обязательно используются защитные диоды, благодаря чему эти схемы могут выдерживать потенциалы до 600 В, но 2000 В они обычно не выдерживают. При работе с незащищенными МОП транзисторами, такими как 3N160, все выводы необходимо держать короткозамкнутыми до тех пор, пока транзистор не будет установлен на плату и распаян. При этом защитные диоды необходимо устанавливать заранее, до установки МОП транзистора. Я проделываю все указанное выше, а затем промываю корпус транзистора сначала органическим растворителем, а затем водой с мылом. Кроме того, высокочувствительные затворные цепи я не размещаю на печатной плате. Вместо этого отгибаю вывод затвора так, чтобы он оказался в воздухе, а затем использую обычный объемный монтаж. Воздух – не только превосходный диэлектрик, но и отличный изолятор [2]. До настоящего времени у меня никогда не было выгоревших входных цепей или больших утечек, по крайней мере превышающих 10 фА.

С другой стороны, работая с цифровыми КМОП интегральными микросхемами, я всегда вставлял их в панельки, находящиеся под напряжением; никогда не использовал токопроводящие пенопласты и не надевал на запястье браслет заземления. И практически не сталкивался с отказами – за одним исключением. Как-то раз я прошел по ковру и указующим перстом ткнул в КМОП интегральную схему. Раздался слабый щелчок электростатического разряда – вероятно, около

5000 В, за которым последовал оглушительный *треск* от взрыва интегральной схемы, в результате чего закоротило весь блок питания. Так как тестирование на устойчивость к электростатическому разряду обычно проводится при отключенном питании, то, проверяя что-нибудь на включенном устройстве, вы можете стать свидетелем эффектной картины выхода его из строя. Всегда будьте осторожны со всеми устройствами, о которых изготовитель заявляет как об устойчивых к электростатическому разряду.

Один из моих читателей напомнил мне, что КМОП интегральная схема иногда не отказывает сразу после того, как через нее пройдет электростатический разряд. Она может стать менее надежной и полностью выйти из строя немного позже. Так что должен предупредить: если, не обеспечив надежного заземления, работать с КМОП интегральными схемами, то это приведет к проблемам, связанным с недостаточной надежностью схем. Если действительно необходимо работать и искать неисправности в КМОП интегральных схемах без надлежащего заземления при условии, что вы решили установить КМОП микросхему во включенный прибор, то просто учтите, что в ряде случаев можно нанести повреждения, последствия которых будут сказываться долго, а проявятся не сразу (рис. 7.2). Так что вам придется самостоятельно все оценить и сделать выбор между возможностью потенциального отказа и преимуществами использования более свободных методов поиска неисправностей.

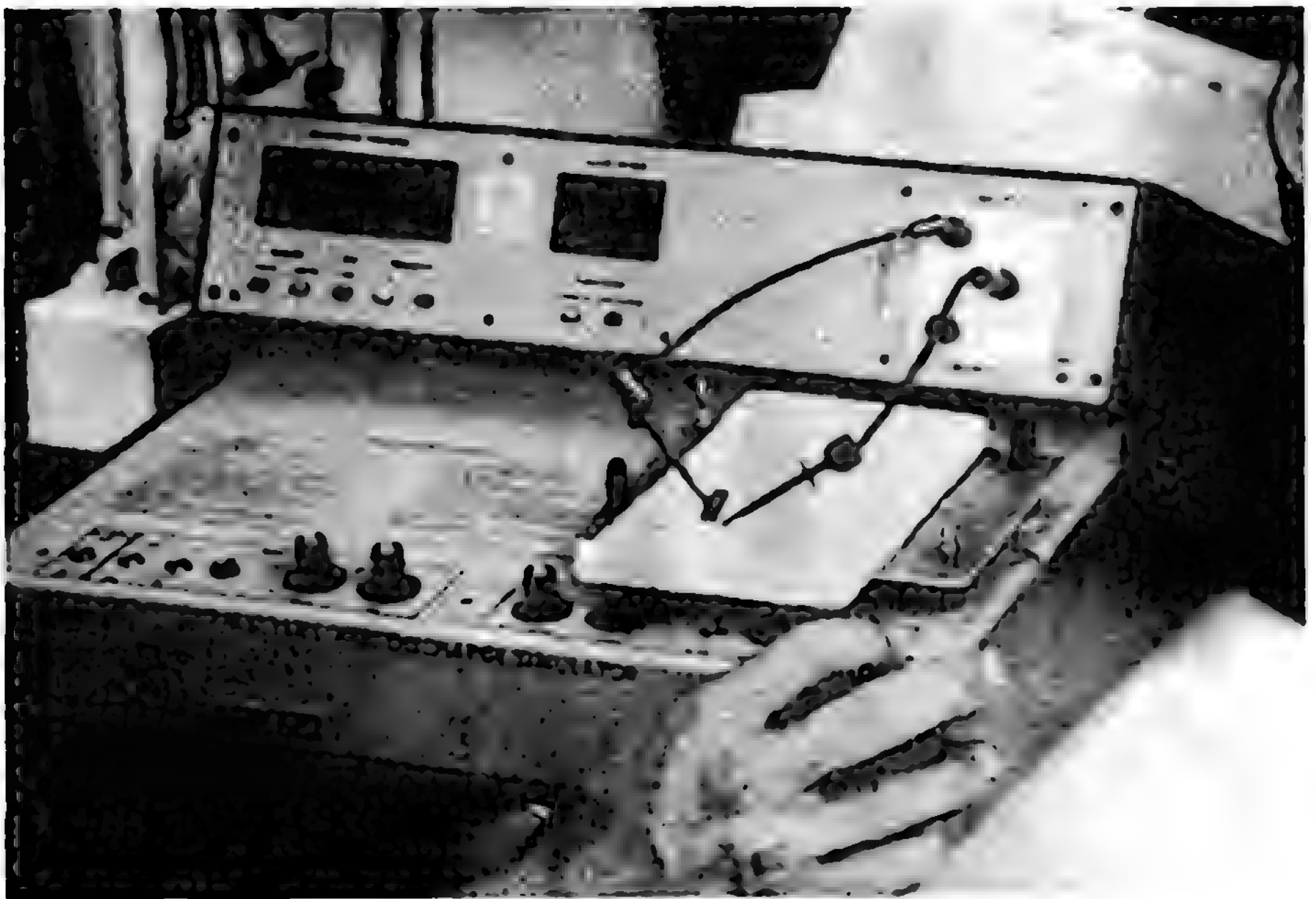


Рис. 7.2. Имитатор электростатических разрядов

Лучше заранее протестировать устройство с помощью имитатора электростатического разряда, чтобы знать, какие неприятности поджидают при воздействии электростатического разряда по всей схеме или по отдельному ее компоненту.

7.3. Мощные транзисторы

Создавая биполярные транзисторы все больших размеров, можно увлечься, перейти к экстремальным масштабам и сотворить гигантский силовой транзистор. Жесткие ограничения на схемы управления накладывает емкость цепи базы, кроме того, возникает необходимость решения проблемы отвода тепла. Тем не менее, какой бы величины ни был силовой транзистор, область применения для него всегда найдется. Самым серьезным препятствием, не позволяющим бесконечно увеличивать размеры транзисторов, является вторичный пробой, то есть именно то, что происходит, когда рабочая точка транзистора выходит за границы «области максимальных режимов». Если использовать силовой транзистор при очень большом токе и маленьком напряжении, распределенное сопротивление эмиттера этого устройства – слагаемое из сопротивления металла вывода эмиттера и удельного сопротивления собственно эмиттера – может привести к такому падению напряжения $I \times R$, которого достаточно, чтобы ток шел по всему эмиттеру и по его периферии.

Теперь давайте в два раза уменьшим ток и в два раза увеличим напряжение: рассеиваемая мощность осталась прежней, но величина $I \times R$ уменьшилась в два раза. Продолжим делить пополам ток и удваивать напряжение. Вскоре мы достигнем такого состояния, когда влияния симметрирующих резисторов (рис. 7.3) будет недостаточно и при большой мощности в области эмиттера образуется *горячее пятно*. Происходящее снижение напряжения V_{BE} вызывает нарастание тока в небольшой ограниченной области кристалла. Если ток немедленно не выключить, то он будет неудержимо расти. Подобный «шнур тока» вызывает локальный перегрев, в результате чего этот участок может расплавиться или даже испариться, – именно такой эффект называется *вторичным пробоем*. Он возникает, когда превышен порог вторичного пробоя прибора. Разработчики линейных интегральных схем используют симметрирующие резисторы, особые топологические приемы, добавляют схемы термозащиты и иные доступные средства, чтобы избежать отказов в аналогичных ситуациях [3]. Подобные средства защиты начинают встраивать и в некоторые модели дискретных транзисторов.

К счастью, многие изготовители включают в технические описания графики областей максимальных режимов для различных напряжений и различных скважностей импульсов. Это позволяет создавать надежные силовые цепи на обычных мощных транзисторах. Вероятность того, что схема выполнена правильно и будет работать надежно, падает по мере увеличения уровня мощности, повышения рабочего напряжения, ухудшения возможностей теплоотвода и приближения режима транзистора к границам области максимальных режимов. К примеру, если винты, крепящие полупроводниковый прибор к радиатору, будут затянуты недостаточно сильно, то теплоотвод ухудшится и прибор может перегреться.

Высокая температура *сама по себе* не может привести к отказу силового транзистора. Однако если схема управления была спроектирована так, чтобы только включать транзистор, а выключаться он должен за счет сопротивления между базой и эмиттером, то при очень высокой температуре транзистор включится, а подходящих условий для его выключения не будет. В результате он может перейти в режим вторичного пробоя, перегреться и выйти из строя. Перегрев, однако, сам

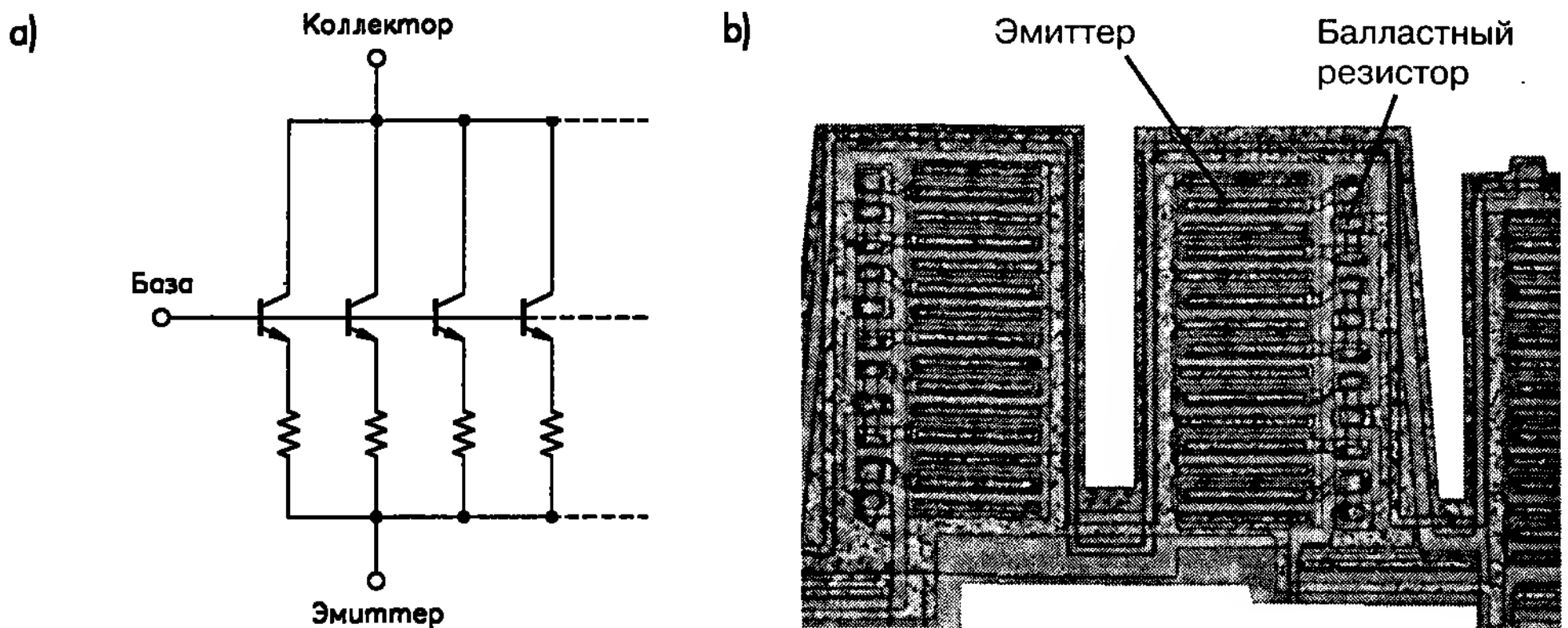


Рис. 7.3. Схема и топология современного мощного транзистора

Балластные (уравнивающие) резисторы, часто называемые симметрирующими, подключают к эмиттерам нескольких параллельно включенных транзисторов (а) для распределения тока и мощности между ними. В интегральных схемах (b) балластные резисторы объединяют с выводами смежных эмиттеров. (На фотографии показана интегральная схема LM138 корпорации National Semiconductor.)

по себе отказа вызвать не может. Как-то раз я зацепил жало паяльника за трехвыводной стабилизатор напряжения, а затем меня позвали к телефону.

На следующий день я обнаружил, что корпус ТО-3 был нагрет до $+300^{\circ}\text{C}$. Считается, что микросхемы допустимо подвергать такому нагреву только в течение 10 с. Однако после охлаждения корпуса стабилизатор работал как надо и его параметры соответствовали норме. К старой аксиоме, гласящей, что нагрев до высокой температуры неизбежно снизит надежность, можно относиться очень критически. Однако все-таки лучше не нагревать силовые транзисторы до высокой температуры и всегда применять такие схемы управления, которые смогут при перегреве принудительно выключить их.

Кроме того, существует вероятность возникновения проблем, если слишком сильно затянут крепеж на радиаторе или если теплоотвод под прибором окажется деформированным, или если на нем будут вмятины и заусенцы, частицы посторонних материалов. Если затянуть болты слишком сильно, то в области теплового контакта корпуса и радиатора возникают механическое перенапряжение, нарушающее нормальный контакт детали и радиатора. В результате перенапряжения кристалл может просто отскочить от пластины, при чрезмерной затяжке крепежа подкладываемая под силовой транзистор изолирующая прокладка может разрушиться сразу или через несколько дней, недель, месяцев работы. Даже если не использовать изолирующие прокладки, слишком энергичное закручивание гаек транзисторов в пластмассовом корпусе остается одним из немногих способов, которыми уродуют или ломают эти элементы. Почему у меня в голове постоянно крутится: максимальный момент затяжки – 10 дюймо-футов, 5 – норма? А потому, что именно такой момент указан в справочной документации фирмы Thermalloy для монтажных винтов типоразмера 6/32, рассчитанных на корпуса типа ТО-220. Попробуйте о том, чтобы иметь справочные данные и для корпусов других типов.

7.4. Правило пяти секунд

Ваши пальцы являются отличным датчиком – только будьте осторожны и не обожгите их слишком большим напряжением или температурой. Есть хорошее эмпирическое правило: если в течение 5 с удается удерживать прижатым палец на каком-нибудь элементе схемы, значит, тепло от него отводится практически так, как надо, а температура корпуса не превышает 85°C . Если же этот элемент достаточно горячий и до него нельзя дотронуться, то поплюйте на палец и чуть троньте исследуемый объект. Если слюна высыхает быстро, то температура корпуса приблизительно 100°C , если испаряется моментально, то он нагрет до 140°C . Существует и более современный способ: купить дорогой инфракрасный детектор с графическим представлением информации. Этот прибор показывает потрясающие цветные картинки на экране телевизора и выдает карты изотермических зон. Вы наверняка узнаете много нового, увидев эти изображения. Примерно пару раз в год у меня возникает желание где-нибудь арендовать или одолжить на некоторое время такой прибор.



Рис. 7.4. Использование достаточно больших радиаторов позволяет избежать многих проблем при работе с мощными усилителями. Коэффициент теплового сопротивления этих радиаторов ниже $0,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$

7.5. Технология изготовления

Еще один аспект, который следует учитывать при использовании биполярных силовых транзисторов, – технология производства. Есть две основных технологии: одна – с использованием эпитаксиальной базы, и вторая – с планарной структурой,

впервые опробованная фирмой Fairchild Semiconductor, – см. рис. 7.5 [4]. (Обратите внимание на приведенные ниже комментарии, посвященные устаревшим диффузионным транзисторам.) Транзисторы, произведенные по технологии с эпитаксиальной базой, обычно надежнее, область их максимальных режимов шире. У транзисторов с планарной структурой выше скорость переключения и более широкая частотная характеристика, но они не столь надежны, как эпитаксиальные. Можно сравнить два типа устройств, посмотрев технические характеристики на транзисторы Motorola 2N3771 и Harris 2N5039. У прибора с планарной структурой 2N5039 произведение полосы частот на усиление по току в 10 раз больше, чем у эпитаксиального 2N3771. Кроме этого, надо отметить, что при использовании 2N5039 в режиме ключа с насыщением этот транзистор обладает более высокой скоростью переключения. Зато при использовании 2N3771 для коммутации индуктивных нагрузок у последнего шире область максимальных режимов. Можно выбрать более важные для конкретного случая характеристики и заказать транзистор того типа, который необходим...

Но будьте осторожны. Если при создании макета был использован транзистор одного типа, а при промышленном производстве – другого, то возможна ситуация, при которой ширина полосы пропускания транзистора увеличится в 10 раз (или в 10 раз уменьшится) или область максимальных режимов не совпадет с соответствующей областью у прототипа. Кроме того, учитывайте, что силовые транзисторы с планарной структурой (популярных серий 2N2222 и 2N3904) при работе в линейной области обладают способностью самовозбуждаться на высокой частоте. Лучше использовать на базе и/или эмиттере ферритовые бусины или трубки для того, чтобы подавить самовозбуждение. Медленным транзисторам с эпитаксиальной базой помощь такого рода требуется нечасто.

Когда я в 1988 году писал эти статьи, посвященные поиску неисправностей, еще встречались «диффузионные транзисторы» серий 2N3055H и 2N3771.

Я подробно рассказал о том, что эти элементы обладают еще более широкой областью максимальных режимов по сравнению с эпитаксиальными транзисторами, и если вам нужен по-настоящему «непробиваемый» транзистор для управления индуктивными нагрузками, вы, возможно, захотите их заказать. К сожалению, эти транзисторы устарели и вышли из употребления. Они были очень медленными ($f_a \sim 0,5$ МГц), имели большую площадь кристалла и высокую стоимость. Хотя при производстве транзисторов требовалась одна диффузия, в ряде случаев длительность этой операции достигала 20 ч. В силу перечисленных причин технического характера уровень продаж падал, и в течение двух последних лет производство таких транзисторов было полностью прекращено.

Так что разговор о старых транзисторах с одной диффузией (рис. 7.6) представляет исключительно академический интерес, и я упомянул о них для того, чтобы сохранить историческую справедливость. Если, заглянув в мои старые статьи в EDN, вы попытаетесь купить рекомендуемые там элементы, то наверняка столкнетесь с непониманием продавцов. После чего у вас могут, наверное, появиться некоторые сомнения относительно собственной психики, дееспособности продавца или Пиза. Когда я наводил справки о наличии этих деталей в продаже, то

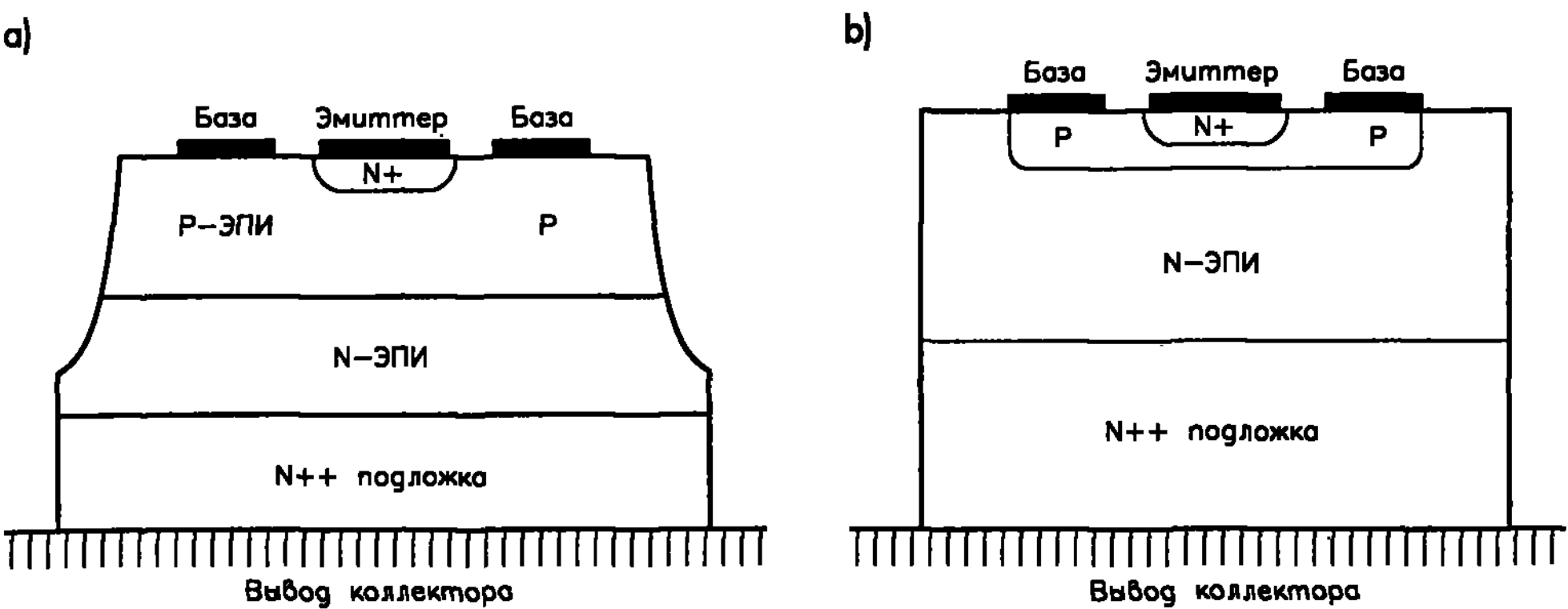


Рис. 7.5. Схемы транзисторов с эпитаксиальной базой (a) и с планарной структурой (b)

Характеристики силовых транзисторов зависят от того, по какой технологии они произведены. Эпитаксиальная база (a) дает возможность использовать несколько различных эпитаксиальных слоев, что, в свою очередь, обеспечивает хорошие характеристики коэффициента усиления, низкое насыщение, небольшой размер кристалла и невысокую стоимость транзистора. Для производства транзисторов такой структуры требуется вытравливание мезоструктур, что объясняет наличие выемок на краях кристалла. Транзисторы с планарной структурой (b) позволяют создавать устройства очень небольших размеров, с узкой базой и хорошей частотной характеристикой. Однако, по сравнению с эпитаксиальным, у этих транзисторов более узкая область надежной работы при прямом смещении.

разговаривал со многими людьми, которые *просто не понимали*, о чем речь. В конце концов мне удалось связаться с технически грамотными специалистами, и они объяснили, почему эти транзисторы невозможно достать – выпуск их прекращен. Я также узнал, что никакие габариты не могли обеспечить транзисторам с планарной структурой ту же ширину области максимальных режимов, что имели транзисторы устаревших типов, не жертвуя при этом имеющимся у планарных транзисторов быстродействием. Кроме того, силовые МОП транзисторы обладали еще более широкой областью максимальных режимов, цены на них падали, и они могли выполнять задачи, для которых области максимальных режимов транзисторов планарной структуры было недостаточно.

Есть еще одна запутанная проблема. Изначально старые транзисторы серии 2N3771 имели планарную структуру. Если нужно было купить транзистор эпитаксиальной структуры, то покупали элемент серии MJ3771. Однако в настоящий момент, если заказать 2N3771, то получите эпитаксиальный транзистор, характеристики которого *полностью* соответствуют техническим условиям на транзисторы серии 2N3771, утвержденным Объединенным советом по электронным устройствам (JEDEC), или превосходят их (например, производство полосы рабочих частот на усиление по току в 10 или 20 раз больше). Так что, если соберетесь заменить *старый* транзистор серии 2N3771 на *новый* той же серии, то учтите, что эти две детали, вероятнее всего, не во всем одинаковы.

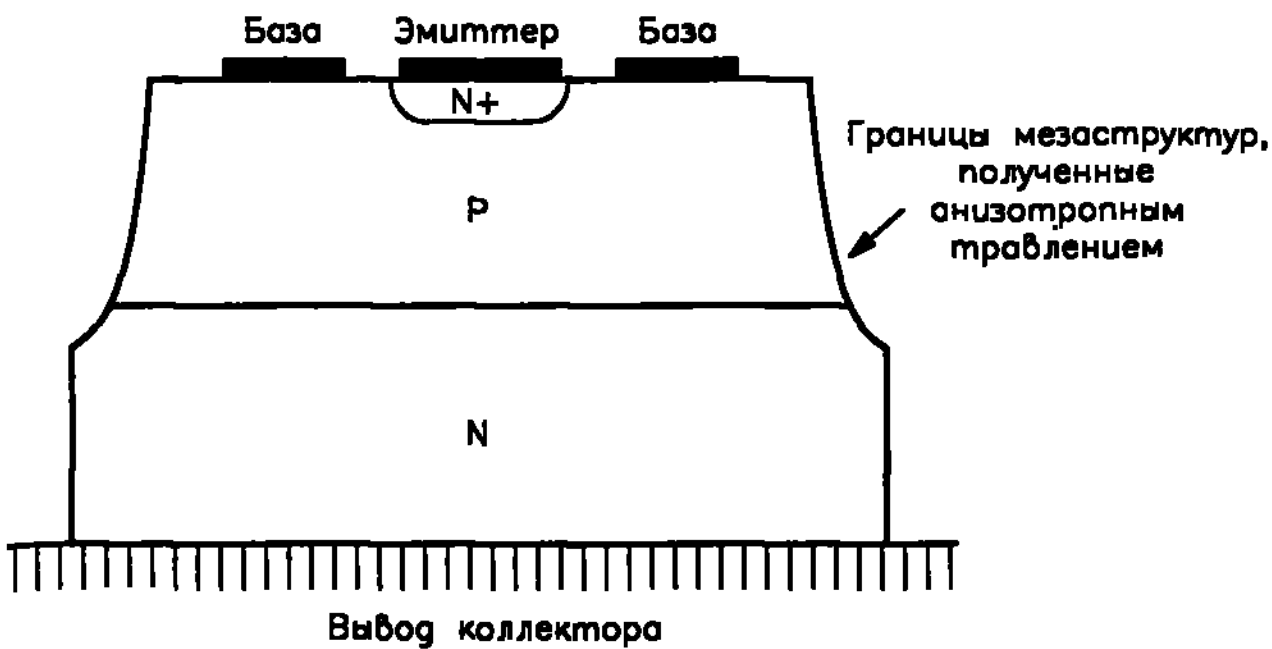


Рис. 7.6. Схема транзистора с одной диффузией

В старых транзисторах с одной диффузией донорные примеси вводились одновременно на верхней и на нижней поверхностях тонкой акцепторной подложки. Использование подобной структуры позволяло получать надежные транзисторы с хорошей повторяемостью параметров, у которых область максимальных режимов при прямом смещении была шире, чем у большинства современных транзисторов эпитаксиальной структуры. Тем не менее от использования транзисторов этой структуры отказались.

7.6. Разработка силовых схем

При разработке многих силовых систем выбрать транзисторы будет не так просто, как в предыдущих примерах. Поэтому будьте внимательны. Конструкторская работа в этой области — задача не для сорвиголов, только что пришедших из вузов. Можно столкнуться с непростыми проблемами, которые наверняка серьезно озадачат даже самых опытных инженеров. К примеру, если попробовать добавить в схему небольшой балластный резистор, чтобы обеспечить распределение тока между несколькими транзисторами, то при этом, возможно, понадобится подобрать транзисторы так, чтобы некоторые их параметры совпадали. А сделать это непросто. Придется досконально учесть условия, в которых будут работать транзисторы, определить, какие именно параметры, к примеру β и V_{BE} , должны совпадать, и разобраться, как при серийном производстве избежать смещения изделий разных производителей. Разрешение подобного рода вопросов, возникающих в ходе работы над схемой, — задача нетривиальная. Если силовая цепь работает ненадежно или неэффективно, то, скорее всего, дело не в отказе бракованного транзистора, а в отказе бракованной схемы управления, отсутствии у нее «запаса прочности» или недостаточном отводе тепла. Возможно, что на место четко определенного прибора случайно установили другой, с иными характеристиками. Или для схемы неверно подобраны транзисторы.

События могут развиваться приблизительно по следующему сценарию. Вы собираете 10 прототипов, и создается впечатление, что они работают нормально. Собираете еще 100, и из них половина не работает. После чего просите меня помочь. Я спрашиваю: «Они когда-нибудь работали так, как надо?» А вы отвечаете: «Да». Однако, минутку. У нас было 10 функционирующих прототипов, но вполне возможно, что при разработке схемы не было предусмотрено резервирование. Наверняка прототипы работали неидеально. Если они все еще поблизости, то было бы неплохо снова заняться ими и посмотреть, нет ли у них каких-либо

недостатков, от которых следует избавиться. Если у 10 прототипов усиление в среднем составляло 22 000, а у схем следующей партии оно равно 18 000, что не удовлетворяет указанному в спецификациях минимальному значению 20 000, то созданные вами новые устройства нельзя назвать «отказавшими». Проблема не в том, что схемы вообще не работают, просто ваши ожидания оказались нереалистичными.

В конце концов каждому инженеру встречались схемы, которые просто не должны были работать, но работали некоторое время. А когда они начинали отказывать, то, несомненно, надежд на починку не было никаких. Итак, что допечет вас быстрее: схемы без технологических запасов или элементы на предельно допустимых режимах? Трудно сказать. Если вы предусмотрите некоторый «запас прочности», то часть схем может сохранить работоспособность. Однако невозможно заложить в конструкцию резерв на все случаи жизни, иначе она превратится в монстра. Именно здесь потребуется весь ваш опыт и рассудительность...

Мой старый приятель из Японии спросил меня: «Почему вы все время говорите о том, что вам приходится ремонтировать 40% устройств в партии импульсных регуляторов? У нас, в Японии, подобная ситуация считается плохой конструкцией...» В ответ я согласился с тем, что такой уровень отказов может служить признаком дефекта конструкции, однако было бы неразумно разбрасываться обвинениями, не разобравшись, в чем собственно проблема. А что, если причиной отказов явилась некачественная сборка? Тогда нет никаких признаков неудачной конструкции – если, конечно, она не настолько сложная, что практически невозможно выполнить все пункты инструкции по сборке. Вероятно, при сборке цепи попала бракованная деталь или при разработке схемы допущена незначительная ошибка, и элементы менять не надо – скорее всего, перед запуском изделия в производство потребуется провести дополнительное тестирование или экранирование отдельных деталей. Так что нельзя, как только обнаружится неполадка, сразу же обвинять инженера-проектировщика в том, что он не справился с работой. А что вы будете делать, если инженер сконструирует схему, которая никогда не будет отказывать (вообще никогда), но при этом, чтобы гарантированно иметь достаточный запас прочности, она будет развивать мощность всего 1 Вт, в ней будут использованы только очень дорогие детали и перед сборкой каждый компонент необходимо будет подвергнуть длительному дорогостоящему тестированию? Это разве удачный проект? Я сомневаюсь. Ведь если вы попытаетесь построить самолет со слишком большим запасом прочности, то у вас может получиться конструкция больше «Боинга-747», предназначенная для перевозки всего 10 пассажиров. Для каждой цепи нужно предусматривать *адекватный* запас прочности. Если использовать только те транзисторы, которые всегда работают качественно, то такой запас прочности может оказаться экономически невыгодным. Чтобы заложить в конструкцию устройства разумный запас прочности, требуется здравый смысл.

7.7. МОП транзисторы

Среди силовых транзисторы МОП имеют определенные преимущества. В течение долгих лет продавались МОП транзисторы, которые переключались быстрее, чем биполярные, и управлять ими было проще. Кроме того, МОП транзисторам

присуща большая устойчивость к вторичному пробою и жгутам тока, что обусловлено стабильностью при высокой плотности тока температурного коэффициента отношения I_{DS}/V_{GS} . Когда часть мощного элемента перегревается, начинает уменьшаться проходящий по ней ток, что обеспечивает МОП транзистору собственную защиту от лавинообразного увеличения тока. Это свойство самостабилизации является основной причиной популярности МОП транзисторов. Тем не менее в некоторых критических статьях отмечается, что, если подать на МОП транзистор сигнал достаточно высокого напряжения, но ток при этом будет малым и плотность его будет небольшой, произойдет изменение знака температурного коэффициента параметра I_{DS}/V_{GS} и присущая этим элементам устойчивость к шнурованию тока утратится [5]. Так что при работе с большим напряжением и малыми плотностями тока необходимо учитывать эту возможность. Если напряжение V_{DS} достигнет высокого уровня, то жгут или шнур тока и «вторичный пробой» могут возникнуть в МОП транзисторе точно так же, как и в биполярном!

Новейшие модели МОП транзисторов надежнее и дешевле старых. Несмотря на то что импульсу, «открывающему или закрывающему» затвор транзистора, может понадобиться довольно много миллиампер, для поддержания его в открытом состоянии нужен гораздо меньший ток, чем для биполярных транзисторов. Новейшие транзисторы также можно быстрее выключать, если обеспечить большой переходной ток затвора.

Несмотря на все вышеупомянутое, у МОП транзисторов есть проблемы. Если подать на МОП транзистор слишком большую мощность, то он может расплавиться, точно так же как расплавился бы биполярный. Если не перегревать транзистор, то самым простым, что может привести к возникновению неисправностей, является отсутствие резистора сопротивлением несколько десятков или сотен ом, включенного непосредственно у вывода затвора. Во всех остальных случаях эти транзисторы обладают столь широкой полосой рабочих частот, что могут самовозбуждаться на гораздо более высоких частотах, чем биполярные.

К примеру, первый из тех, что я когда-либо видел, Hi-Fi усилитель НЧ, собранный полностью на МОП транзисторах, сгорел. Он отлично работал в лаборатории, но нашлись «горе-инженеры», решившие, что если в диапазоне 5 Гц – 50 кГц прибор работал хорошо, то в диапазоне 0,5 Гц – 500 кГц он будет работать еще лучше.

В результате, когда для демонстрации кабели динамиков были удлинены, этот усилитель издал пронзительный «вопл» на частотах в несколько мегагерц и незамедлительно выпустил облако дыма, так как демпфирующие цепочки на истоках транзисторов отсутствовали. Мне рассказали, что после незначительной переделки усилитель стал работать абсолютно надежно. В ходе «переделки» полоса рабочих частот была заужена до разумных пределов, в истоки установлены симметрирующие резисторы, а непосредственно к выводам затворов были припаяны защитные резисторы (в американской литературе по ламповой технике они назывались anti-snivet (snivet – паразитная высокочастотная генерация, впервые обнаруженная в ламповых телевизорах, – генерация того же рода, что возникает в МОП транзисторе, если последовательно к его затвору не подключен резистор)).

Как и биполярные, МОП транзисторы очень надежны, если при работе их напряжение, ток и температура не превышают номинальных значений. Причины

неудовлетворительной надежности или эффективности транзистора обычно вызваны проблемами схем управления или окружающими транзистор элементами. У большинства МОП транзисторов предельное напряжение $V_{GS} = 20$ или 25 В. Такой транзистор может некоторое время выдерживать напряжение на затворе в $30\text{--}50$ В, но постоянно пользоваться этим режимом небезопасно. Если подать на затвор транзистора напряжение, превышающее номинал, то может произойти частичная деградация усиления или порогового напряжения. Так что не делайте этого, пожалуйста! Кроме того, МОП транзисторы не столь устойчивы к электростатическим разрядам, как биполярные приборы. Обычные меры предосторожности заключаются в использовании развязок, фиксации уровня или же установке цепи ограничения тока, для того чтобы выводы, подключаемые к внешним устройствам, могли выдержать электростатический разряд.

ДМОП транзисторы настолько просты в использовании, что мы обычно забываем о паразитном биполярном транзисторе, который подключен параллельно им. Если на стоке полевого транзистора скорость изменения напряжения dV/dt окажется слишком большой, при условии что стоковый переход будет пробит слишком большим напряжением и током либо транзистор перегреется, то паразитный биполярный транзистор включится и моментально погибнет.

Но я ужасно избалован и привык пользоваться линейными интегральными схемами, в которых встроены защитные транзисторы. (Большая часть проблем с транзисторами достается именно разработчикам интегральных схем.) Построение на дискретных элементах возможно для многих электронных устройств и эффективно в финансовом смысле, а использование линейных интегральных микросхем, в особенности операционных усилителей, может значительно облегчить решение поставленной перед вами задачи и повысить при этом надежность разрабатываемого устройства.

В следующей главе мы подробно рассмотрим все входы и выходы операционных усилителей и обсудим их внутреннее строение.

Литература

1. Leonard, Charles, "Is reliability prediction methodology for the birds?", *Power Conversion and Intelligent Motion*, November 1988, с. 4.
2. Pease, Robert A., "Picoammeter/calibrator system eases low-current measurements", *EDN*, March 31, 1982, с. 143.
3. "A 150W IC Op Amp Simplifies Design of Power Circuits", R. J. Widlar и M. Yamatake, AN-446, National Semiconductor Corp, Santa Clara, CA.
4. Applications Engineering Staff, PowerTech Inc., "Speed-up inductor increases switching speed of high current power transistors", *Power Electronics*, May 1989, с. 78.
5. Passafiume, Samuel J. и William J. Nicholas, "Determining a MOSFET's real FBSOA", *Powertechnics Magazine*, June 1989, с. 48.

8. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Характер работы операционного усилителя в той или иной схеме очень часто определяется внешними навесными элементами, и именно по этой причине мы их рассматривали в первых семи главах. Но и сами операционные усилители не всегда абсолютно безупречны. Можно выделить две области потенциальных проблем – самовозбуждение и шум.

Перелистав множество страниц, на которых обсуждались вопросы работы с различными радиоэлементами, вы наконец-то добрались до самих операционных усилителей. Спешу обрадовать: половину проблем, связанных с поиском неисправностей в операционных усилителях, мы уже решили. Почему так? Все дело в том, что многочисленные неполадки и неисправности в работе схем на операционном усилителе вызываются именно теми элементами, которые работают вместе с ним. Как-никак популярность операционным усилителям принесло именно то, что параметры практически всех схем на их основе, в частности усиление и частотные характеристики, определяются внешними навесными элементами.

Итак, если схема на операционном усилителе имеет ошибочное значение усиления сигнала, то нужно проверять отклонения сопротивления резисторов от номинала, а не сам операционный усилитель. Рассматривая какой-нибудь работающий на переменном токе усилитель, фильтр или интегратор, у которого параметры выходного сигнала отличаются от расчетных, следует проверять конденсаторы, а не сам операционный усилитель. Если же обнаружится паразитная генерация, то ищите, нет ли пульсаций или иных паразитных переменных составляющих на шинах питания и не слишком ли велик фазовый сдвиг в цепи обратной связи. Если «реакция на единичный скачок» или импульсная (переходная) характеристика на экране осциллографа выглядит «слабовато», стоит проверить сам осциллограф, его щупы или генератор импульсов, так как они могут раскалиброваться или попросту отказать с той же вероятностью, что и сам операционный усилитель. Все аналогичные отказы являются причиной подробного внимания в этой книге к пассивным и дискретным компонентам, так как общая работоспособность схемы

часто определяется именно этими элементами. Хотя, конечно, и из этого правила есть исключения. Все-таки возможны ситуации, когда причиной неисправности становится именно операционный усилитель.

8.1. Нельзя пренебрегать мелочами

Прежде чем перейти к серьезным проблемам, следует рассмотреть некоторые малосущественные виды сбоев и неисправностей схем с операционными усилителями. В общем случае было бы неразумно считать, что операционный усилитель обеспечивает линейную передаточную характеристику по усилению и что только нелинейность этой характеристики заслуживает внимания. Что можно сказать об операционном усилителе, коэффициент усиления которого, например, для сигнала положительной полярности равен 600 000, а отрицательной – 900 000? Выглядит данная ситуация крайне неприятно. Действительно, подобные различия в крутизне амплитудной характеристики могут вызвать в схеме обычного инвертора нелинейные искажения порядка 10 мкВ при размахе сигнала на выходе, составляющем 20 В. Но, черт возьми, коэффициенты напряжения и вызванные температурными коэффициентами сопротивлений резисторов, используемых в цепи обратной связи, вызывают гораздо большие погрешности и искажения. Даже у самых высококачественных металлопленочных резисторов коэффициент напряжения составляет $0,1 \text{ млн}^{-1}/\text{В}$, что вызовет нелинейность большей величины, чем рассмотренное несовпадение коэффициентов усиления для сигналов разной полярности.

Однажды я слышал, как один «специалист» заявил, что операционный усилитель с высоким коэффициентом усиления по постоянному току, равным 2 000 000 или 5 000 000, не имеет никаких практических преимуществ по сравнению с усилителем, коэффициент усиления по постоянному току которого равен 300 000. Он говорил, что если частота подаваемого на вход усилителя сигнала выше 0,1 Гц, то нельзя воспользоваться преимуществом высокого коэффициента усиления. Я, безусловно, с этим не согласен. При импульсном входном сигнале напряжение на выходе точно устанавливается на правильное значение менее чем за 1 мс, а не за 1 с и более. У усилителя с большим коэффициентом усиления выходной сигнал устанавливается точнее, и для этого не нужно дополнительного времени. Мне кажется, что этот «специалист» просто не понимает, как работает операционный усилитель. Особенно учитывая то, что он даже не хочет говорить о нелинейности коэффициента усиления! Многие операционные усилители, такие как устаревший ОР-07, обладают малым коэффициентом усиления по постоянному току и плохой линейностью этого коэффициента. Более современные операционные усилители типа ОР-07 и LM607 производства компании National Semiconductor (коэффициент усиления не меньше 6 000 000) имеют гораздо меньшую нелинейность передаточной характеристики.

В технической документации на операционный усилитель может быть указано значение температурного коэффициента напряжения смещения нуля, равное $1 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$, но реальный дрейф этого операционного усилителя в одном диапазоне температур будет составлять $0,33 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$, а в другом – уже $1,2 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$. Для

большинства устройств вовсе не обязательно, чтобы температурный коэффициент напряжения смещения нуля был меньше $0,98 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$ во всем рабочем диапазоне температур. Во многих случаях вполне достаточно, чтобы у операционного усилителя номинальный температурный коэффициент напряжения смещения нуля составлял $1 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$, а дрейф не превышал 49 мкВ при температуре кристалла 50°С .

Кроме того, не стоит слишком часто вспоминать о токах смещения (входных) и их температурных коэффициентах или о температурном коэффициенте погрешности коэффициента усиления. Если все погрешности «ведут себя хорошо» и «упрятаны в маленькую коробочку», то перед нами весьма качественный электронный прибор.

Теперь одно классическое предостережение. Я включил его в эту книгу, так как оно никогда не упоминалось в серии моих статей в журнале EDN. 45 человек видели черновики моих работ, потом тысячи людей видели мои статьи и *ни один* из них не сказал, что я про него забыл. А предостережение заключается в следующем: если устанавливать операционный усилитель в схему с высокоомными элементами, *не следует использовать* потенциометр коррекции напряжения смещения нуля V_{OS} для того, чтобы установить ноль на выходе схемы. Например, если в качестве повторителя с единичным коэффициентом усиления используется микросхема LM741, при этом выходное сопротивление источника 500 кОм , а сопротивление резистора обратной связи 470 кОм , то входной ток смещения, достигающий 200 нА (в худшем случае), мог бы вызвать смещение нуля выходного сигнала на 100 мВ . Если попытаться использовать подстроечный потенциометр для корректировки этой погрешности, то ничего не получится. В случае, когда эта погрешность, определяемая по закону Ома как $I \times R$, составляет всего 20 или 40 мВ , с ней удастся справиться, но при этом устойчивость и температурные коэффициенты окажутся неудовлетворительными. Таким образом, необходимо учитывать, что во всех случаях, когда произведение $I_{OS} \times R$ превышает несколько милливольт, возникает потенциальная опасность больших погрешностей по постоянному напряжению, и очень трудно компенсировать эти погрешности, не вызвав других. Если вы не желаете мириться с первопричиной ошибок, необходимо использовать более качественный операционный усилитель со значительно меньшими входными токами смещения.

Так где же мне удалось найти этот совет, который предостерегает от приведения к нулю погрешностей, вызываемых злополучным $I \times R$, корректировкой напряжения смещения нуля V_{OS} с помощью потенциометра? В одной из глав книги “Data Converter Handbook” фирмы Analog Devices [1]. Я знаю об этом уже 25 лет, но в настоящее время данная проблема не относится к числу наболевших. Никто об этом не вспоминает, и я забыл упомянуть в своих статьях. Вот вам еще одно подтверждение того, что надо все записывать!

8.2. Синфазные сигналы

Хорошим примером неправильного толкования технической документации служат погрешности, вызываемые синфазными сигналами. Часто считают, что коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС) операционного усилителя равен 100 дБ .

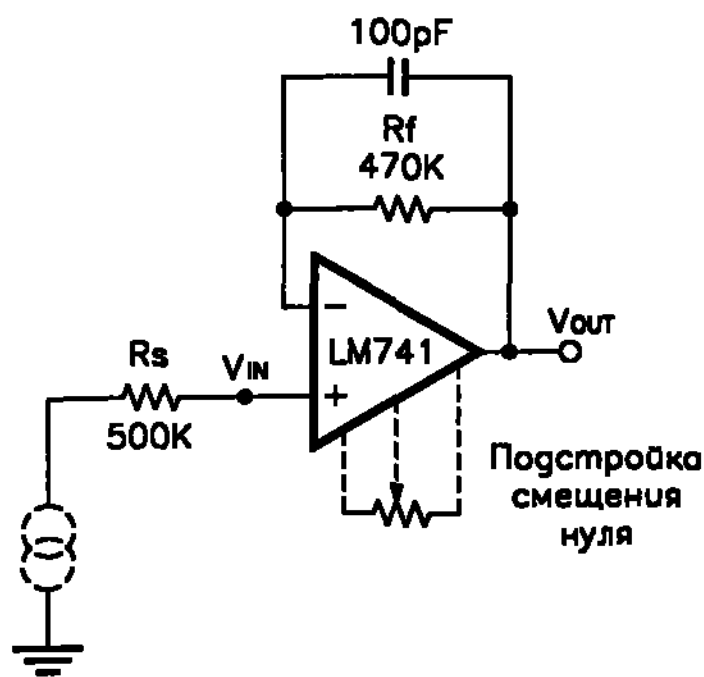


Рис. 8.1. Повторитель на ОУ

При подключении операционного усилителя в схему с большими сопротивлениями ($I_b \times R > 20 \text{ мВ}$) появятся значительные погрешности, а с помощью потенциометра коррекции смещения нуля $V_{\text{смещения}}$ компенсировать их практически невозможно.

Означает ли это, что погрешности, вызываемые синфазными сигналами, составляют в точности одну часть от 100 000 и определяются строгой линейной зависимостью погрешности в 10 мкВ на 1 В? Вероятность возникновения подобного, безусловно, существует, но очень небольшая. Скорее всего, зависимость напряжения смещения нуля от значения синфазного напряжения на входах – функция нелинейная (рис. 8.2). В некоторых пределах всего диапазона входного напряжения тангенс угла наклона ΔV_{OS} будет гораздо лучше, чем 1 часть от 100 000. В других пределах эта величина может принимать худшие значения.

Я по-настоящему сержусь, когда слышу утверждения типа: «У операционного усилителя есть коэффициент передачи по синфазному сигналу A_{VC} , коэффициент усиления дифференциального сигнала A_{VD} , а коэффициент ослабления синфазного сигнала равен их отношению». Оно бессмысленно: нельзя сказать, что коэффициент усиления дифференциального сигнала или коэффициент передачи по синфазному сигналу операционного усилителя можно выразить одним определенным числом. Ни на одном из современных операционных усилителей эти коэффициенты не имеют постоянного значения и не могут быть измерены с какой-либо точностью или определенной повторяемостью. Не доводите до полного абсурда, пытаясь измерить «коэффициент передачи по синфазному сигналу в нуле» для того, чтобы вычислить, что тангенс угла наклона кривой коэффициента ослабления синфазного сигнала равен бесконечности. Гораздо больше смысла в результатах измерения напряжения смещения нуля (V_{OS}), в зависимости от напряжения синфазного сигнала (V_{CM}), и в анализе как линейной, так и нелинейной областей этой кривой.

8.3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала

Если в точку А схемы, изображенной на рис. 8.3, подать синусоидальный или треугольный сигнал, то создастся впечатление, что погрешность выходного сигнала, как показывает незаземленный осциллограф, будет равна $(N+1)$, умноженному на напряжение V_{CM} , деленное на коэффициент ослабления синфазного сигнала. Однако это не совсем так: вы получите $(N+1)$, умноженное на [погрешность от синфазного сигнала + погрешность усиления]. Таким образом, на средних частотах, когда усиление уже падает, а коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС) все еще высок, вы получите главным образом погрешности усиления, и график

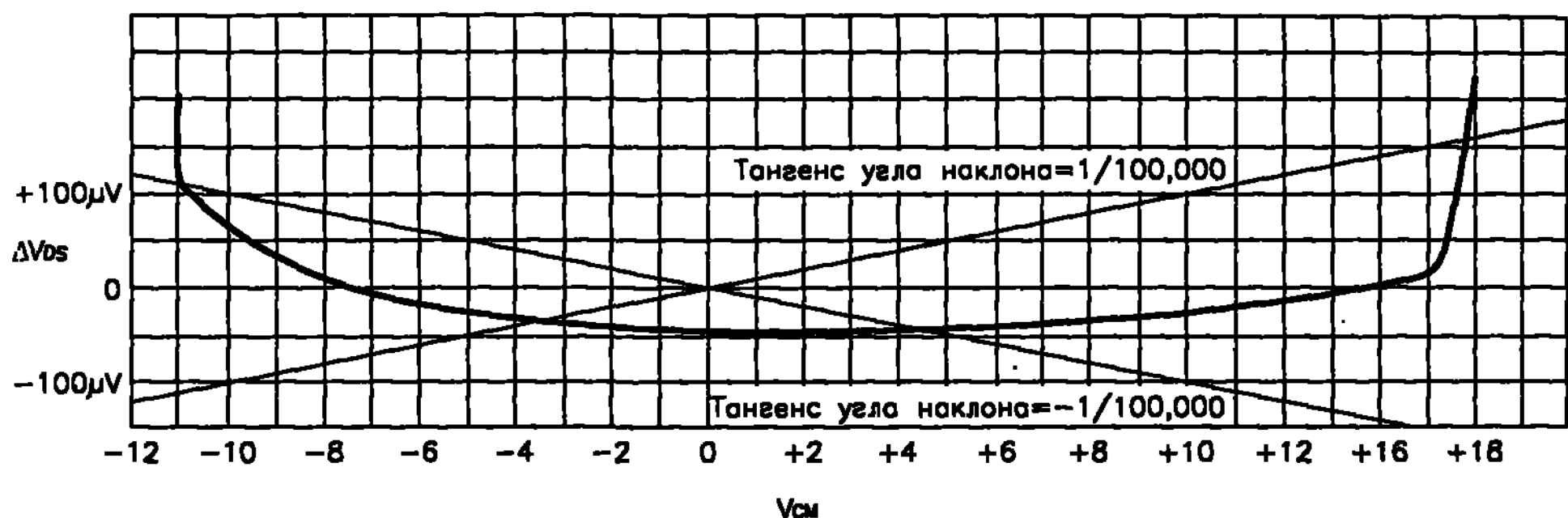


Рис. 8.2. График реального КОСС

Коэффициент ослабления синфазного сигнала – это не константа. Кривая зависимости напряжения V_{OS} от V_{CM} имеет существенно нелинейный характер. Для сравнения на графике приведена линейная функция, тангенс угла наклона которой составляет одну часть от 100 000.

зависимости коэффициента ослабления синфазного сигнала от частоты будет выглядеть как диаграмма Бode – то есть АЧХ проверяемого усилителя. Если использовать схему, приведенную на рис. 8.3, то именно это вы и будете наблюдать! Все еще сохранились и находятся в обращении технические условия на операционные усилители, в которых утверждается, что график коэффициента ослабления синфазного сигнала представляет собой диаграмму Бode. Именно такие графики даны, например, в технической документации на усилители LF400 и LF401 фирмы National Semiconductor. Мы собираемся исправить эти графики и показать, что у таких операционных усилителей ослабление синфазного сигнала на самом деле гораздо выше коэффициента усиления при 100 или 1000 Гц. National, кстати, – не единственная компания, в технических описаниях которой встречается такая грубая ошибка...

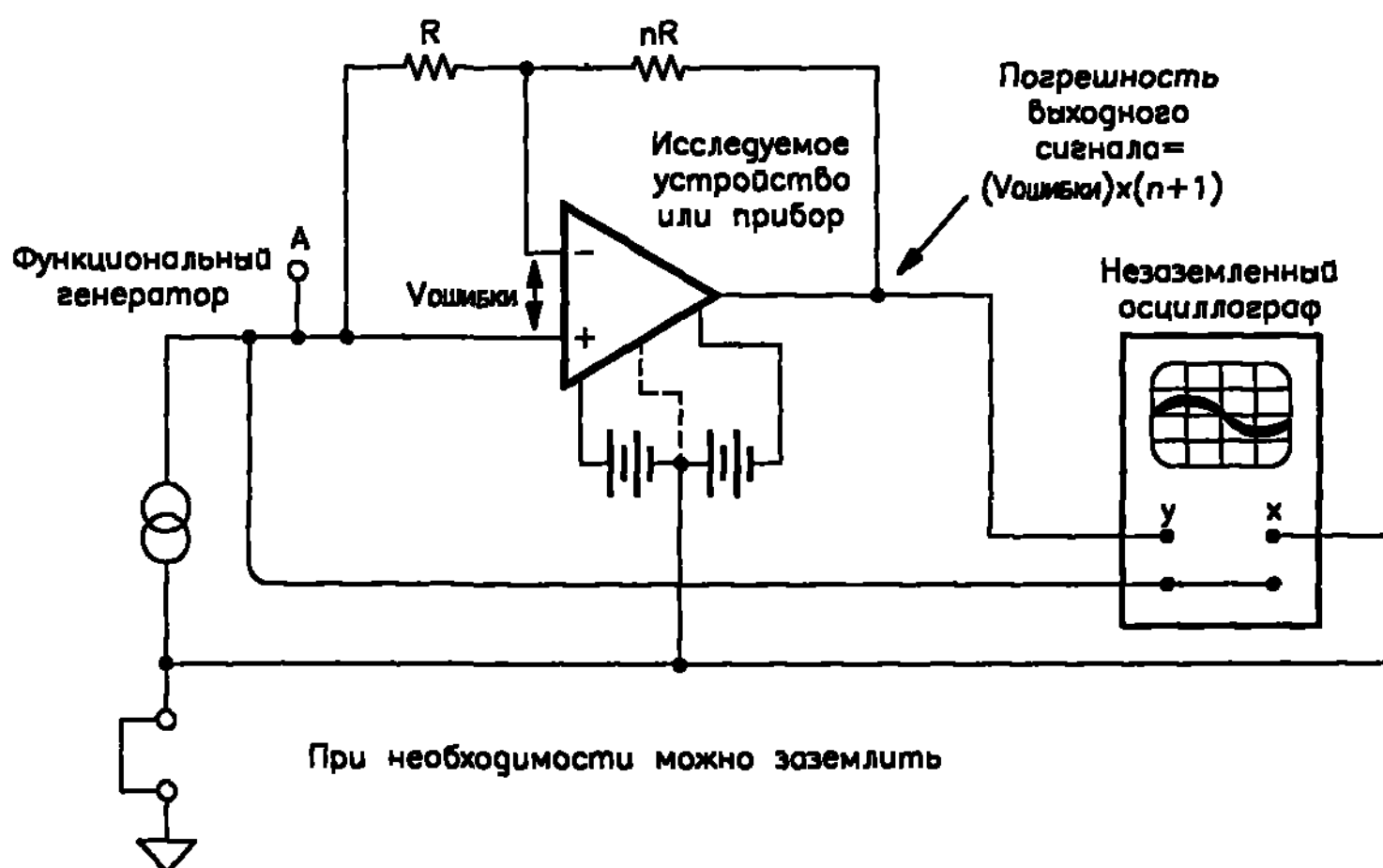


Рис. 8.3. Первая схема измерения КОСС

Может ли эта схема использоваться для измерения коэффициента ослабления синфазного сигнала? Нет, так как $V_{ОШИБКИ} = V_{CM} / (КОСС) + V_{OUT} / A_V$.

Давайте откажемся от этого незаземленного плавающего осциллографа, подключим генератор синусоидальных сигналов к средней точке источника питания и хорошо заземлим и осциллограф, и точку А схемы (рис. 8.4).

Уж теперь-то мы получим истинное значение интересующего нас коэффициента, так как уровень выходного сигнала будет держаться на потенциале заземления, а не колебаться туда-сюда – так? Нет, не так! Схема функционирует точно так же, как и в предыдущем примере, ничего не изменилось, за исключением точки наблюдения. Выходному сигналу, привязанному к потенциалу источника питания, *обязательно* придется колебаться в такт с сигналом генератора, так что с помощью этой схемы можно иметь *все тот же ошибочный результат*. Возможно ли выявить зависимость коэффициента ослабления синфазного сигнала от частоты? Нет. В результате получится график зависимости коэффициента усиления от частоты.

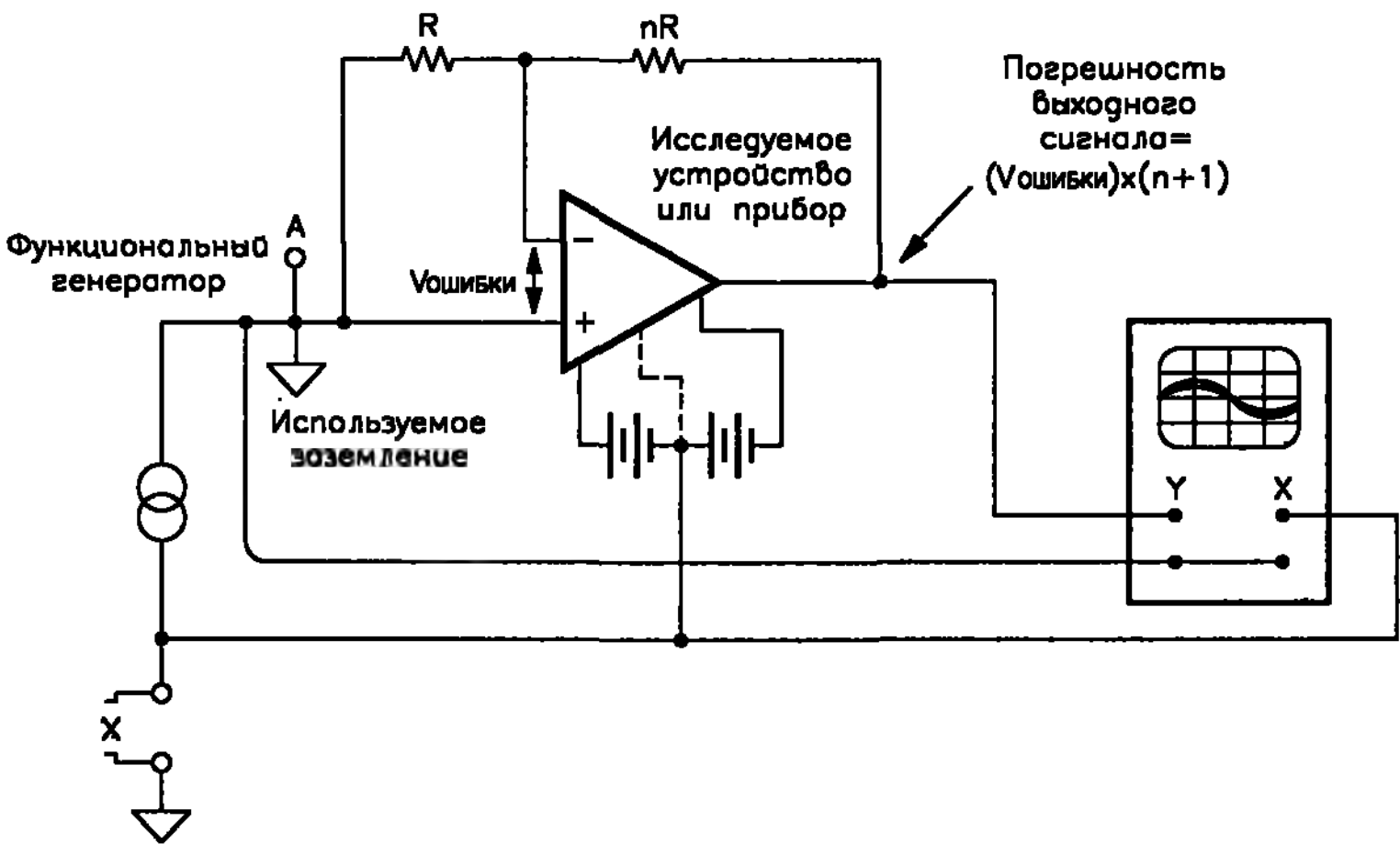


Рис. 8.4. Вторая схема измерения КОСС

Схема этого измерителя ничем не лучше схемы измерения коэффициента ослабления синфазного сигнала, приведенной на рис. 8.3. Напряжение $V_{\text{ошибки}}$ по-прежнему равно $V_{\text{см}} / (\text{КОСС}) + V_{\text{out}} / A_v$.

А что, если в качестве альтернативного варианта применить хорошо известную схему, показанную на рис. 8.5? В ней дополнительный усилитель замыкает петлю обратной связи по сигналу ошибки и для него не требуется, чтобы выходной сигнал операционного усилителя каким-либо образом колебался.

При постоянном напряжении все будет отлично – эта схема подходит для проверок в статическом режиме, для использования в составе автоматического измерительного оборудования и для промышленного контроля в условиях серийного производства.

Она будет давать те же результаты, что и описанная ниже схема, при любых низких частотах, вплоть до того момента, когда результаты начнут отличаться друг от друга. А при какой частоте это произойдет? Никто не знает! Это вызвано

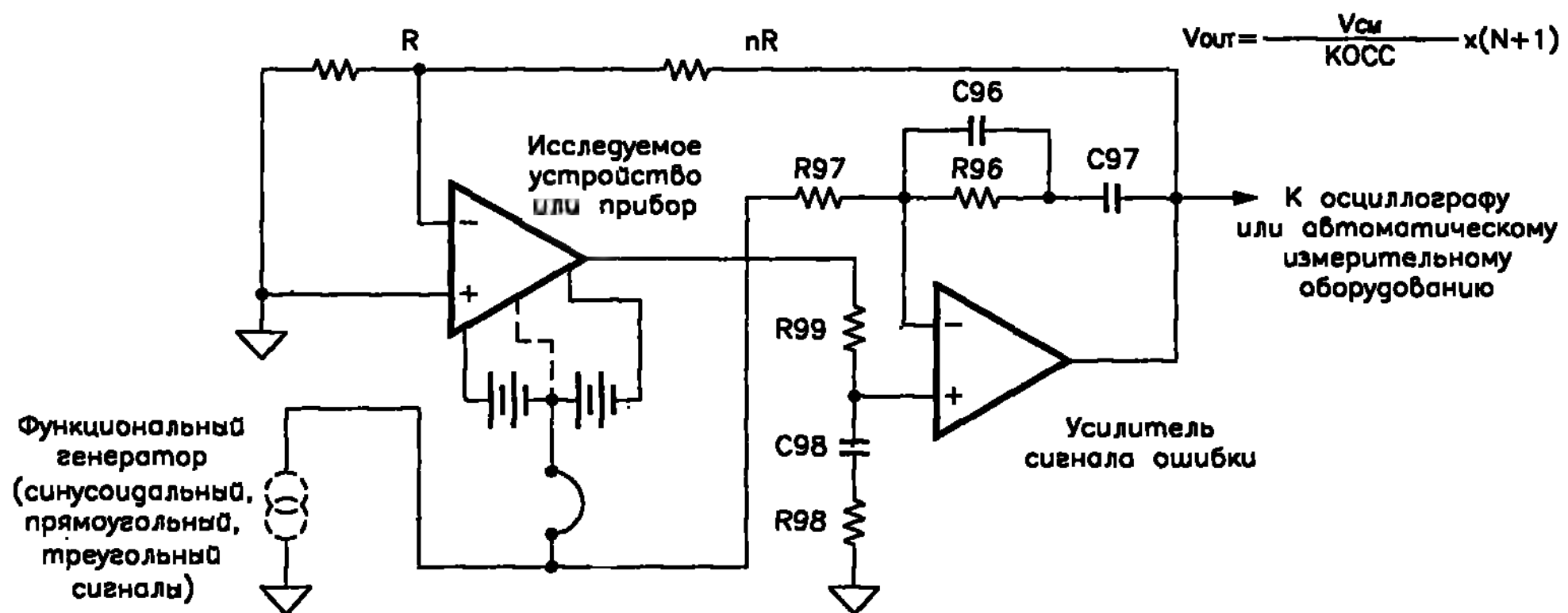


Рис. 8.5. Рабочая схема измерения КОСС

Эту схему можно использовать для определения коэффициента ослабления синфазного сигнала на постоянном токе в автоматическом испытательном оборудовании. Но для нее трудно подобрать номиналы сопротивлений и конденсаторов, а также пригодность подобной системы для какой-либо определенной частоты.

тем, что при работе с операционным усилителем, у которого низкий коэффициент ослабления синфазного сигнала, вспомогательная схема будет выдавать точные результаты до одной частоты, а для операционного усилителя с высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала результаты будут точными до другой частоты. Кроме того, вспомогательный усилитель так сильно повышает усиление в петле, что «звон», перегрузка входным сигналом или общая неустойчивость в некоторой области средних частот становятся неизбежными. Мне не хочется волноваться по поводу этих проблем – я просто использую схему, которая позволяет получать четкие и предсказуемые результаты.

Исследуя микросхему LF356 с помощью схемы, показанной на рис. 8.3, я получил размах напряжения погрешности в 4 мВ при частоте входного сигнала 1 кГц – это значительная квадратурная ошибка. Фазовый сдвиг относительно выходного сигнала составлял 90° (см. рис. 8.6а).

Если предположить, что это и есть погрешность по синфазному сигналу, то коэффициент ослабления синфазного сигнала равен всего лишь 5000 при частоте 1 кГц и быстро падает по мере увеличения частоты. Однако реальная погрешность коэффициента ослабления синфазного сигнала составляет всего около 0,2 мВ (см. рис. 8.6b), следовательно, коэффициент ослабления синфазного сигнала приблизительно равен 100 000 при частоте 1 кГц и ниже.

Также отметим, что у этого устройства зависимость погрешности от синфазного сигнала на самом деле нелинейная: по мере приближения напряжения к –9 В она будет становиться все более и более нелинейной. При источнике питания ±12 В напряжение синфазного сигнала может изменяться от –9 до +12 В. Я решил использовать источник напряжения ±12 В, чтобы сигналом моего генератора можно было бы при необходимости перегружать входы исследуемого прибора.

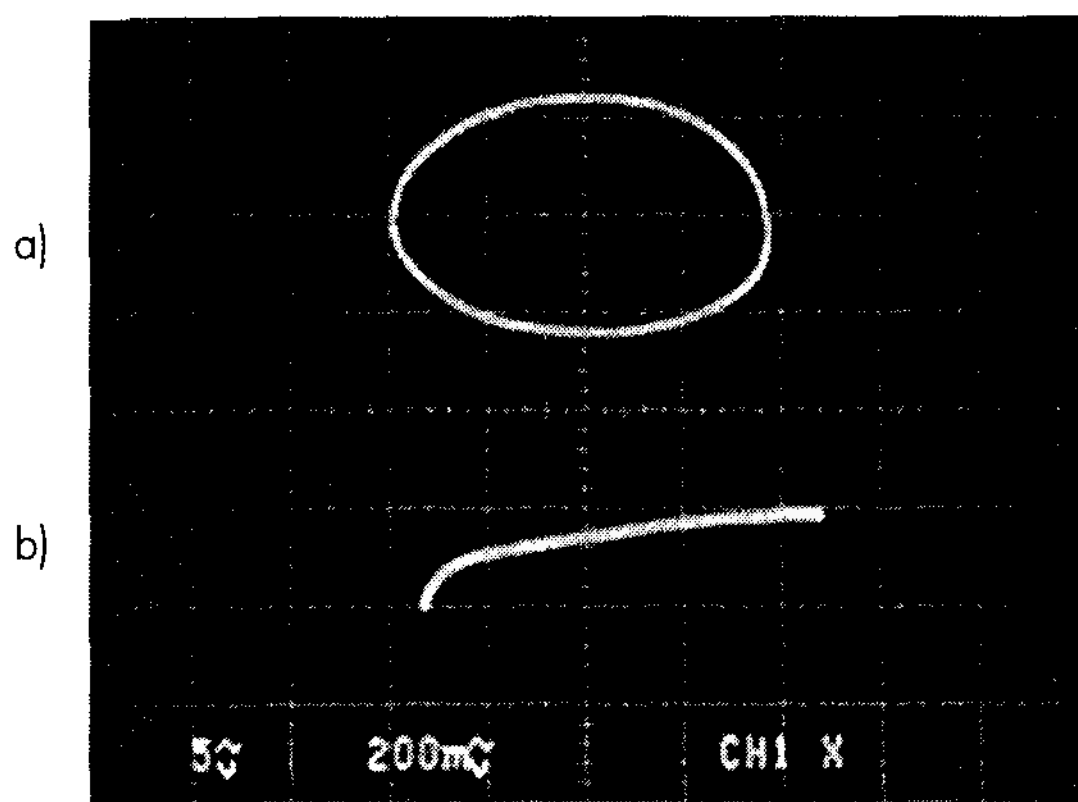


Рис. 8.6. Осциллограмма КОСС

Осциллограмма погрешности коэффициента ослабления синфазного сигнала (а), получаемая при использовании схемы, приведенной на рис. 8.3. На самом деле это погрешность усиления, составляющая 4 мВ при частоте 1 кГц. Осциллограмма (получена по схеме на рис. 8.7) реального напряжения погрешности синфазного сигнала (б), которая составляет приблизительно 1/20 от погрешности коэффициента усиления (б).

8.4. Как надо измерять КОСС

Есть ли способ измерить этот коэффициент и получить точные результаты?

На рис. 8.7 изображена схема, которая создана около 22 лет тому назад. У нее есть свои недостатки, но это самая удачная схема из всех, что я видел. Давайте зададим $R1 = R11 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = R12 = 1 \text{ кОм}$, $R3 = 200 \text{ кОм}$, а в качестве $R4$ используем однооборотный графитовый или подобный ему потенциометр сопротивлением 500 Ом. Тогда коэффициент усиления по шумам будет определяться как $1 + [R_f / R_{in}]$, что составит около 11. Если подать синусоидальный сигнал амплитудой $\pm 11 \text{ В}$ на вход измерительной схемы, то напряжение синфазного сигнала составит около $\pm 10 \text{ В}$. Погрешность передачи выходного сигнала будет приблизительно равна 11, умноженному на погрешности измерения плюс значение некоей функции, в качестве аргументов которой выступают допуски на номиналы сопротивлений всех указанных резисторов. Для начала подключим выходной сигнал к осциллографу в режиме с внешней разверткой (X-Y) и будем вращать потенциометр до тех пор, пока погрешность выходного сигнала не станет очень маленькой, то есть пока линия на экране не займет горизонтальное положение. Мы не знаем, что происходит: то ли коэффициент ослабления синфазного сигнала компенсируется погрешностью резистора, то ли что-то иное, но, как потом оказывается, это и неважно. Нужно добиться того, чтобы погрешность в выходном сигнале, показываемая на экране осциллографа, который работает в режиме с внешней разверткой, стала совсем небольшой. Теперь подсоединим в качестве $R100a$ резистор сопротивлением 200 Ом. Подсчитав значение коэффициента усиления по шумам, убедимся, что оно выросло с 11 до 111. А именно: усиление по шумам сначала вычислялось как $(1 + R2 / R1)$, а затем увеличилось до $(1 + R2 / R1) + (R2 + R12) / R100$. В нашем примере увеличение стократное, так что можно наблюдать изменение V_{OUT} , эквивалентное умноженной на 100 погрешности передачи входного напряжения (а это и есть напряжение V_{CM} , деленное на коэффициент ослабления синфазного сигнала).

Это напряжение ошибки вряд ли является линейной функцией от напряжения V_{CM} , и именно по этой причине я рекомендую наблюдать за ее изменением с помощью осциллографа, переключенного в режим с внешней разверткой (X-Y). Предположение, что коэффициент ослабления синфазного сигнала одинаков при

всех уровнях напряжения, а погрешность при синусоидальных сигналах определяется линейной функцией от напряжения $V_{\text{см}}$, ошибочно. Результатом такой ошибки может стать измерение параметров только в двух точках. При этом считается, что при любом другом напряжении наблюдается линейная зависимость ошибки, что уж слишком глупо. Даже с помощью устройства для автоматического контроля и испытаний необходимо снимать значение как минимум в трех точках при четырех или пяти различных значениях напряжения. Еще одна веская причина для использования осциллографа в режиме с внешней разверткой (X-Y) – возможность визуально определить уровень шумов. Для измерения погрешности коэффициента затухания синусоидального сигнала ни в коем случае нельзя использовать вольтметр переменного напряжения. К примеру, в схеме, показанной на рис. 8.6, минимальное строгое значение погрешности синусоидального сигнала составляет 0,2 мВ, а не 0,3 мВ двойной амплитуды (это значение можно было бы получить с измерительным прибором, чувствительным к уровню шумов).

При наличии хорошего усилителя, коэффициент ослабления синфазного сигнала которого приблизительно равен 100 дБ, погрешность уровня синусоидального сигнала составит приблизительно 200 мкВ двойной амплитуды. Используя по-настоящему высококачественное устройство, для которого этот коэффициент равен 120 или 140 дБ, и подключив к схеме резистор R100b сопротивлением 20 Ом, можно получить коэффициент Δ (усиление по шумам) равным 1000. Шум увеличится в 1000 раз, однако при этом точно так же будет усилено и напряжение погрешности. Я не собираюсь ломать голову над вопросом, пытаться точно определить, насколько достоверно получаемое значение коэффициента ослабления синфазного сигнала, или же ограничиться тем, что значение этого коэффициента лучше, чем указано в технических описаниях. В любом случае продемонстрированный подход – самый удачный из всех.

При работе с устройствами автоматического контроля осциллограф не нужен. Можно использовать ступенчатый или трапециевидный сигналы и просто измерять напряжение постоянного тока в крайних точках, в средней точке или любой другой. Обратите внимание, что постоянно крутить ручку потенциометра и настраивать его слишком тщательно нет необходимости. Достаточно знать, что усиление по шумам из слабого становится сильным и изменяется погрешность выходного сигнала. В данном случае нас интересует именно *изменение* погрешности выходного сигнала, то есть не реальное значение двойной амплитуды до или после увеличения коэффициента усиления по шумам, а разность значений этих двух погрешностей.

Не надо крутить потенциометр, добиваясь идеальной формы сигнала, однако для того, кто работает за монтажным столом, это отличный способ проверить все возможные варианты.

С этой схемой можно всласть позабавиться. После того как она начнет работать, вы наверняка захотите протестировать все операционные усилители, которые попадутся, оценив, насколько четкую и подробную характеристику операционного усилителя можно получить с помощью этой схемы. Она позволяет *прочувствовать*, что происходит, а не просто выдает сухие и непонятные числа. Например, если выходной сигнал, который порожден погрешностью 22 мкВ, достигает 22 мВ, то очевидно реальный коэффициент ослабления синфазного сигнала доходит

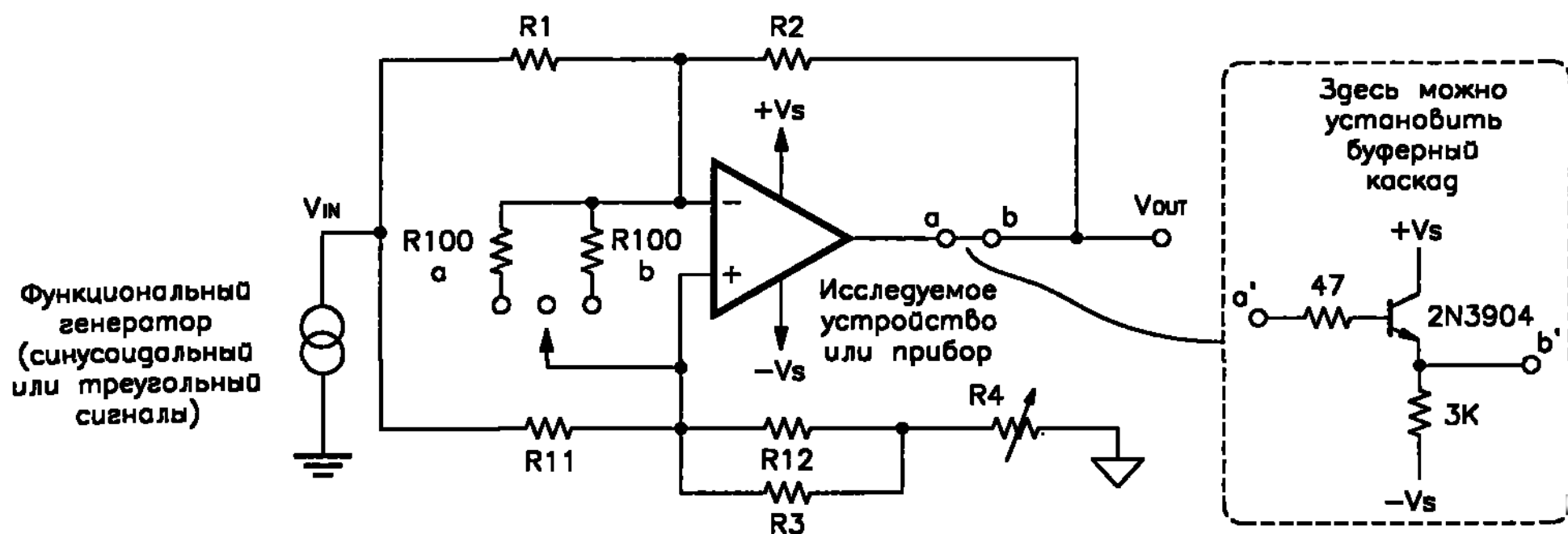


Рис. 8.7. Схема Пиза для измерения КОСС

Схема измерения коэффициента ослабления синфазного сигнала может быть использована как для постоянного, так и для переменного тока.

Примечание к рис. Для того чтобы выбирать различные сопротивления резистора $R100$, используйте мини-адаптер типа «крокодильчик».

Пусть $R3 = 40 \times R12$; $R4 = R12/20$; $R1 = R11$; $R2 = R12$.

Сопротивления всех резисторов могут отличаться от номинала не больше, чем на $\pm 1\%$.

$V_{cm} = V_{in} \times R2 / (R1 + R2)$;

$V_{погрешности} = V_{cm} / КОСС$;

V_{out} прямо пропорционально $V_{погрешности}$.

до 1 000 000. А это куда более информативно, чем «мертвое» число 119,2 дБ. Кроме того, довольно быстро удастся понять, что важны также крутизна наклона диаграммы и кривизна экрана осциллографа. Не все усилители, обладающие одинаковым коэффициентом ослабления синфазного сигнала, равным 119,2 дБ, ведут себя одинаково. Далеко не все. У одних градиент положителен, у других может оказаться отрицательным, а у остальных бесконтрольно меняться таким образом, что если снимать параметры в двух точках, то могут получиться различные значения в результате разницы градиентов, зависящие от того, какие точки контроля были выбраны. (Если увеличить амплитуду подаваемого на усилитель сигнала, то, помимо всего прочего, можно точно определить участки сильного искажения — иначе говоря, ширину рабочего диапазона синфазных сигналов.)

Есть одно ограничение: если задать коэффициент усиления по шумам, равный 100, то коэффициент передачи этой схемы при частоте F_{GBW} , деленной на 100, будет на 3 дБ меньше. В таком случае можно было бы использовать эту схему при частотах приблизительно до 1 кГц для обычного операционного усилителя с полосой 1 МГц и при частотах до 100 Гц — при усилении 1000. В конце концов это не так плохо.

Чтобы определить коэффициент ослабления синфазного сигнала для частот, превышающих 1 кГц, можно использовать резистор $R100$ с сопротивлением 2 кОм, что позволит получать достоверные результаты на частотах до 10 кГц. Иначе говоря, с этой схемой нужно будет поработать, чтобы понять, когда она выдает корректные данные. Придется подумать. Мне очень жаль.

Для ускорения событий я перехожу к высокоскоростной модификации моей схемы с невысоким усилением. В этом случае $R1 = R11 = 5$ кОм, $R2 = R12 = 5$ кОм,

а R100 может принимать одно из значений: 2, 1 или 0,5 кОм. Эта модификация отлично работает при частотах 50 кГц и выше, в зависимости от того, каким было произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания у исследуемого усилителя.

Чтобы получить наиболее достоверные результаты при переменном напряжении, очень важно избежать паразитных емкостей выводов реального переключателя в тех точках, где схема подключается к резисторам R100a или R100b. Обычно мне удавалось добиться отличных результатов, просто цепляясь к резистору с помощью мини-зажима. Этот способ позволяет избавиться от паразитных пикофарад. Если использовать высококачественный переключатель, оптимизированной для ВЧ конструкции, в котором все выводы аккуратно отделяются один от другого воздушным промежутком (а это отличный изолятор), то, возможно, удастся получить вполне приемлемый диапазон частот, но при этом необходимо учитывать, что есть вероятность измерить коэффициент затухания по переменному току всей конструкции, а не самого операционного усилителя.

Я обсуждал эту разработку с коллегами и понял, что для построения упомянутого R100 лучше всего припаять 100-омное сопротивление к неинвертирующему и точно такое же к инвертирующему входу, а затем соединить свободные выводы, получив при этом сопротивление в 200 Ом.

Если у вас есть операционный усилитель с небольшим усилением или низким значением g_m , то, возможно, вам захочется установить в разрыв цепи, обозначенный точками a – b, буферный повторитель, причем такой, чтобы исследуемый усилитель не выдавал серьезных ошибок из-за малого коэффициента усиления. Для усилителя LM6361 производства компании National буфер понадобится, так как его усиление – всего 3000 при нагрузке 10 кОм, а обсуждаемый коэффициент гораздо выше 3000.

Я считаю, что в целом предложенная схема обладает более четким разрешением и, если она используется для вычисления погрешности синфазного сигнала, с ней возникает гораздо меньше проблем, чем с какой-либо другой.

8.5. Однополярное питание

Почти каждую неделю раздается звонок и клиент спрашивает: «Можно ли включать выпускаемый вашей фирмой LM108 (или LF356, или LM4250) в схемы, использующие однополярное питание? В технических условиях об этом ничего не сказано...»

Мы с готовностью и вежливо объясняем, что любой операционный усилитель можно включать с однополярным питанием. У LM108 нет вывода «земли». Ему все равно, как промаркированы провода, подающие питание: +15 В и –15 В, или +30 и «земля», или «земля» и –30 В. Все зависит от названия, точнее от того, как вы назовете провода и какую шину решите считать землей.

Ни у кого не вызывает сомнения, что питание и сигналы на усилитель надо подавать надлежащим образом. LM108/LM308 могут усиливать сигналы, уровни которых отличаются от уровня обоих полюсов питания, – напряжение входного сигнала должно быть по модулю как минимум на несколько вольт меньше напряжения на каждой из шин питания. Таким образом, если нужна схема, обрабатывающая входные сигналы, уровень которых близок к уровню минусовой шины питания,

то LM108 не подойдет. В данном случае *можно* применить LM324, LM358, LMC660, LMC662 и LM10. Если понадобился усилитель для работы с сигналами, уровень которых близок к плюсовой шине, то в такой ситуации гарантированно будут работать LM101A или LM107. (LF355 и LF356 обычно тоже работают нормально, но их работоспособность не гарантируется.)

Однако если вы сможете установить уровень входного сигнала приблизительно посередине между потенциалами шин питания, то практически любой операционный усилитель будет работать при однополярном питании. Все определяется исключительно названиями шин. Мы давно планируем дополнить руководства по применению и больше не заниматься пустяками, а отвечать на сложные и серьезные вопросы клиентов, но пока ни у кого нет времени сесть и написать нужное дополнение.

8.6. Входное сопротивление или входной ток

Дифференциальное входное сопротивление – это еще одна характеристика операционного усилителя. Меня иногда спрашивают: «Каким образом мы можем измерить входное сопротивление операционного усилителя?» И каждый раз я отвечаю: «Этого делать не нужно». В большей части операционных усилителей существует тесная корреляция между входным током и входным сопротивлением, поэтому, если входной ток достаточно мал, то входное сопротивление (дифференциальное и общего вида) должно быть большим.

Дифференциальное входное сопротивление обыкновенного биполярного дифференциального каскада составляет $1 / (20 \times I_b)$, где I_b – ток смещения (иначе – входной ток). Однако эта величина меняется, если операционный усилитель содержит эмиттерные резисторы отрицательной обратной связи или встроенную схему компенсации входных токов. Входное сопротивление для синфазного сигнала легко определить, измерив I_b как функцию V_{cm} .

Я провел множество измерений входной емкости и считаю, что схемы, приведенные на рис. 8.8, весьма полезны. Данные о входной емкости представляют определенный интерес только для высокоомных высокоскоростных буферов или фильтров, работая с которыми, вы хотите убедиться, что изделия «второго поставщика» имеют такие же емкости, как и нормально работающий операционный усилитель.

8.7. Ложные неисправности

Иногда при работе операционного усилителя может быть зарегистрирован отказ, который на самом деле им не является. К примеру, если у исследуемого операционного усилителя выходное напряжение падает со скоростью 0,3 В/мкс, то напряжение на инвертирующем входе или в точке суммирования *отличается* от напряжения «земли». Причем это различие может достигать 15, 30 или даже 100 мВ. Почему же напряжение разбаланса такое большое, ведь в технических условиях приводится величина 2 или 4 мВ?

Несоответствие напряжения на инвертирующем входе напряжению на «виртуальной земле» – это как раз то, о чем ничего не сказано в книгах. Теория «виртуальной

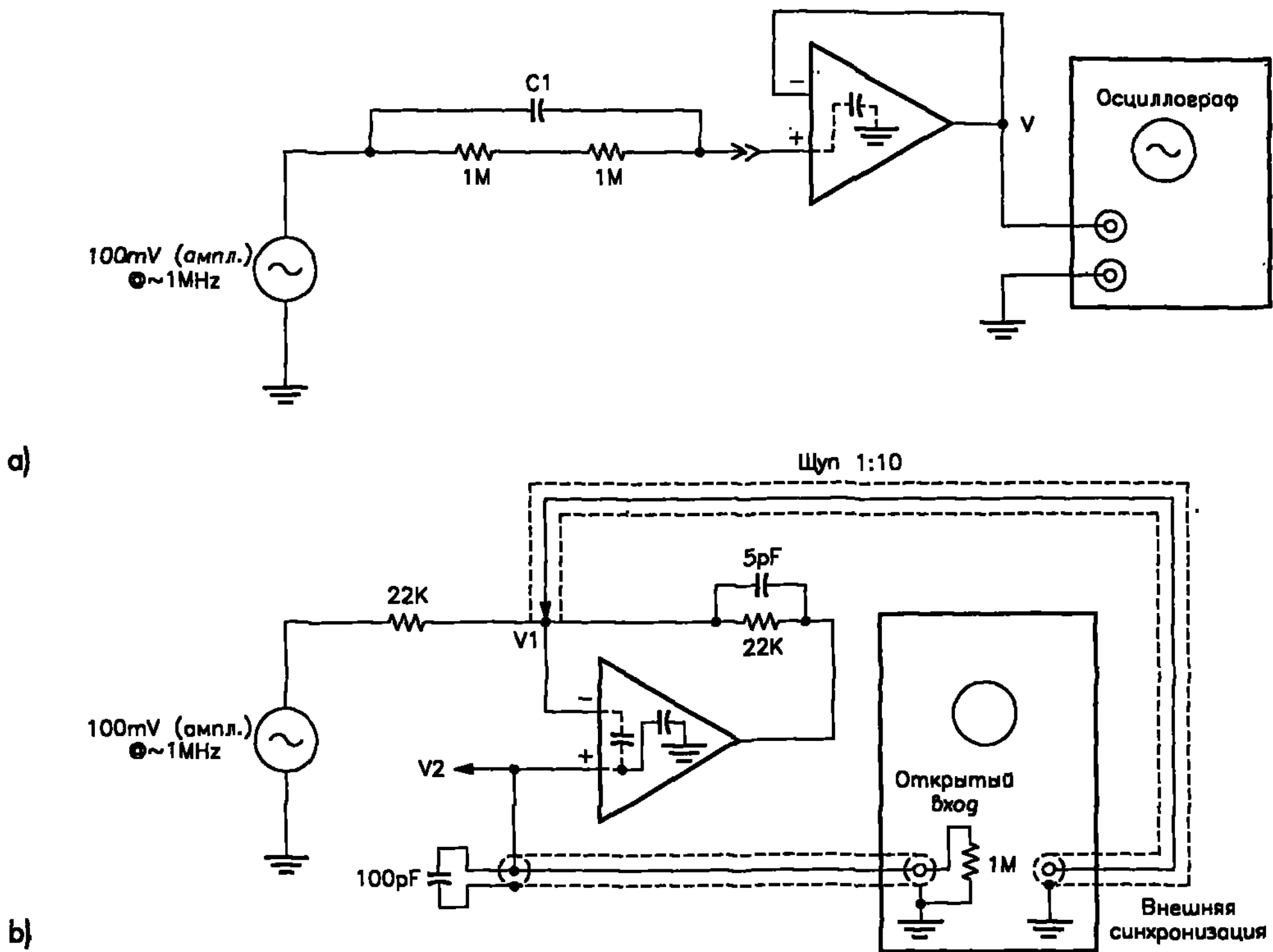


Рис. 8.8. Входные емкости ОУ

Схема для определения входной емкости операционного усилителя для синфазного сигнала (а). При $C1 = C_A \approx 5$ пФ измерьте $V1 = V_A$. Тогда $C_{in} = C_A \times (V_B - V_A) / [V_A - V_B \times C_A / C_B]$. Для получения более точных результатов проводник, по которому подается сигнал, нужно подключать к неинвертирующему входу исследуемого устройства с помощью зажима. И не надо вставлять этот вывод в панельку. Схема для измерения дифференциальной входной емкости операционного усилителя (б): $C_{in(differential)} = V2_{(p-p)} \times C_{total} / [V1_{(p-p)} - V2_{(p-p)}]$, $C_{total} = C_{in(синфазного сигнала)} + C_{кабеля} + C_{входная осциллографа} + 100$ пФ.

земли» применима для постоянного тока и низких частот, однако если выходной сигнал имеет среднюю или высокую частоту, то бессмысленно ожидать, что напряжение в точке суммирования будет соответствовать «земле». В нашем примере $dV_{out} / dt = 2\pi$, умноженное на частоту единичного усиления и на входное напряжение. Таким образом, V_{in} в 15 мВ вполне приемлемо для операционных усилителей со средней полосой рабочих частот, таких как LF356, а для LM741 вполне допустимо 50 или 70 мВ. Чтобы выходной сигнал операционного усилителя изменялся со сколько-нибудь заметной скоростью, на его вход необходимо подать значительное напряжение рассогласования, по крайней мере на непродолжительное время.

В этом смысле остерегайтесь математических моделей операционных усилителей и той ошибочной информации, которую можно получить при их использовании. К примеру, стандартное уравнение, описывающее коэффициент передачи

операционного усилителя с одним полюсом АЧХ, выглядит так: $A = A_0 \times 1 / (1 + j\omega T)$. Это уравнение подразумевает, что когда усиление по постоянному току, A_0 , изменяется, то усиление по высокой частоте, A , изменяется пропорционально. А это *неверно!* С ростом популярности компьютерного моделирования мне приходится каждый месяц объяснять это потенциальным аналитикам. *Нет*, не наблюдается практически никакой корреляции между частотными характеристиками и допустимым разбросом коэффициента усиления по постоянному току ни для одного типа операционного усилителя, представленного в продаже сегодня. Известно несколько факторов, влияющих на коэффициент усиления по постоянному току: изменение температуры, включение или снятие нагрузки или же замена одного экземпляра усилителя другим, имеющим более высокое или низкое усиление по постоянному току. Несмотря на то что в каждом из перечисленных случаев коэффициент усиления по постоянному току может меняться на несколько октав, эффективность усилителя остается практически неизменной. Если когда-либо и существовали усилители, частотные характеристики которых действительно зависели от коэффициента усиления по постоянному току, то от них уже много лет назад отказались.

Итак, модель операционного усилителя считается качественной, если его эффективность постоянна. Однако, если на частоте 1 МГц усиление модели удваивается всякий раз, когда удваивается постоянная составляющая при увеличении сопротивления нагрузки, то это означает, что надо приготовиться к неприятностям и путанице. В одной книге, посвященной операционным усилителям, я прочел, что при изменении усиления по постоянному току частота первого полюса АЧХ сохраняется. То есть, по мнению автора, с увеличением усиления по постоянному току возрастает эффективность усилителя. *Неверно.* Я написал автору об этом, но ответа от него не получил.

Мне часто встречается техническая документация на операционные усилители, в которых для выходного сопротивления с разомкнутой петлей обратной связи указано 50 Ом. Проверив усиление для двух различных сопротивлений нагрузки, можно убедиться, что при 1 кОм усиление по постоянному току уменьшается в два раза. Известно, что если имеется операционный усилитель с выходным сопротивлением 1 кОм, то его усиление действительно уменьшается в два раза при подключении нагрузки в 1 кОм. Но если его выходное сопротивление было бы 50 Ом, как указано в технической документации, то усиление снизилось бы только на 5%. Поэтому вне зависимости от того, что перед вами – компьютерная модель или реальный усилитель, относитесь с недоверием к заявлениям о нереально низком выходном сопротивлении устройства.

8.8. Реальные проблемы

Какие же неприятности подстерегают при работе с операционным усилителем без учета отказов остальных элементов схемы? Может попасться экземпляр с плохим значением V_{os} . Или, при изменении температуры, коварные выводы усилителя и проводники печатной платы, которые сделаны из меди, образуют термопары, где появляется небольшая разность напряжений между выводами операционного

усилителя. Эта разность может составлять $0,10-0,05\text{ }^{\circ}\text{C} \times 35\text{ мкВ} / ^{\circ}\text{C} = 3,5-1,75\text{ мкВ}$. Хороший способ, позволяющий избежать этого, – использование небольшого защитного кожуха, закрывающего все компоненты усилителя, чтобы защитить их от источников тепла и солнечного света. Это очень выручает, если мощность усилителя невелика. А если она большая, остается только повторять: «Тепло – враг точности». Когда интегральная схема обрабатывает мощные сигналы, при этом рассеивая много тепла, то вряд ли она будет работать так же, как и без перегрева. Сюда же следует добавить следствия нагрева и других элементов, расположенных рядом.

Кроме этого, не следует забывать, что не все одностипные операционные усилители имеют точное соответствие по параметрам максимальных размаха выходного напряжения и выходного тока или по частотной характеристике. Каждые 4–5 месяцев раздается телефонный звонок и клиент жалуется: «Мы получили новую партию ваших операционных усилителей, и у них параметры размаха выходного напряжения (выходного тока или частотной характеристики) хуже, чем у интегральных схем из предыдущей партии». При проверке оказывается, что в 98% случаев элемент с «хорошими» характеристиками – случайное отклонение от нормы в лучшую сторону. Видимо, покупатель считает, что у всех элементов в партии характеристики должны быть выше среднего уровня. Не стоит паниковать, если несколько интегральных схем имеют характеристики, которые, хотя и превосходят гарантированные в технических условиях значения, все-таки ниже, чем хотелось бы.

Принцип Пиза

В течение долгих лет я предостерегал всех: если схема вашего стабилизатора или усилителя самовозбуждается, то недостаточно просто добавлять в нее резисторы и конденсаторы до тех пор, пока колебания не исчезнут. Если пойти по этому пути, то на некоторое время самовозбуждение удастся ликвидировать, но после того, как вы успокоитесь, оно неизбежно вернется и, подобно пресловутому крокодилу, схватит вас за нежное место, причинив невыносимые страдания.

По окончании проектирования и монтажа «заплатки», которая, по вашему мнению, надежно защищает от самовозбуждения, ПРОЗОНДИРУЙТЕ выходы усилителя прямоугольными сигналами различной амплитуды, частоты и при различных токах нагрузки. Проще всего выполнить такое испытание, подключив генератор прямоугольных импульсов к схеме через последовательно соединенные резистор сопротивлением 200 Ом и керамический дисковый конденсатор емкостью 0,2 мкФ. Подключите генератор к осциллографу так, чтобы последний можно было синхронизировать по фронту прямоугольного сигнала. Также необходимо подключить подстроечный резистор в качестве нагрузки, которая позволит испытывать устройство во всем разрешенном диапазоне выходных токов или же, если проверяется операционный усилитель, по всему допустимому диапазону значений выходного напряжения и тока.

При проверках операционных усилителей необходимо использовать различные значения емкости нагрузки. Это позволит убедиться, что устройство работает, на ваш взгляд, в наиболее тяжелых условиях, соответствующих эксплуатационным. Для некоторых выходных каскадов с эмиттерными повторителями наименее благоприятная емкость нагрузки составляет приблизительно 10–50 пФ. При увеличении емкости нагрузки самовозбуждение может исчезнуть.

Указанные выше номиналы в качестве рекомендованного значения разрешается использовать не для всех элементов. При проведении тестирования 5-амперного стабилизатора напряжения, наверное, понадобится резистор номиналом 1–2 Ом. Если проверяется мало-мощный усилитель или микромощный источник опорного напряжения, то, возможно, потребуется, чтобы номиналы резистора нагрузки и резистора, подключаемого к генератору прямоугольных импульсов, были порядка 1 МОм. В данном случае рекомендую подумать.

Если в процессе проверки выходного каскада устройства этот выход «зазвенит» как колебательный контур с высокой добротностью, то это будет означать, что у подготовленной вами «заплатки» недостаточный запас устойчивости. Если выходной сигнал просто «стучает» и никакого «звона» или перегрузки при этом не наблюдается, то можно считать, что самовозбуждение подавляется успешно и у «заплатки» большой «запас прочности». Отлично! Теперь берем фен для волос и хорошенько прогреваем макет схемы, чтобы убедиться, что и в таких условиях корректирующая цепь работает как надо, а выходной каскад не «звенит» или не «поет» при нагреве конденсатора, силового транзистора, управляющей интегральной схемы или еще чего-нибудь.

Предлагая данную методику, я не имею в виду, что не стоит проводить полного анализа устойчивости петли общей обратной связи. Но способ, который здесь описан, позволяет буквально за 5 минут убедиться в том, что схема может (или нет) выдержать всеобъемлющие и исчерпывающие испытания.

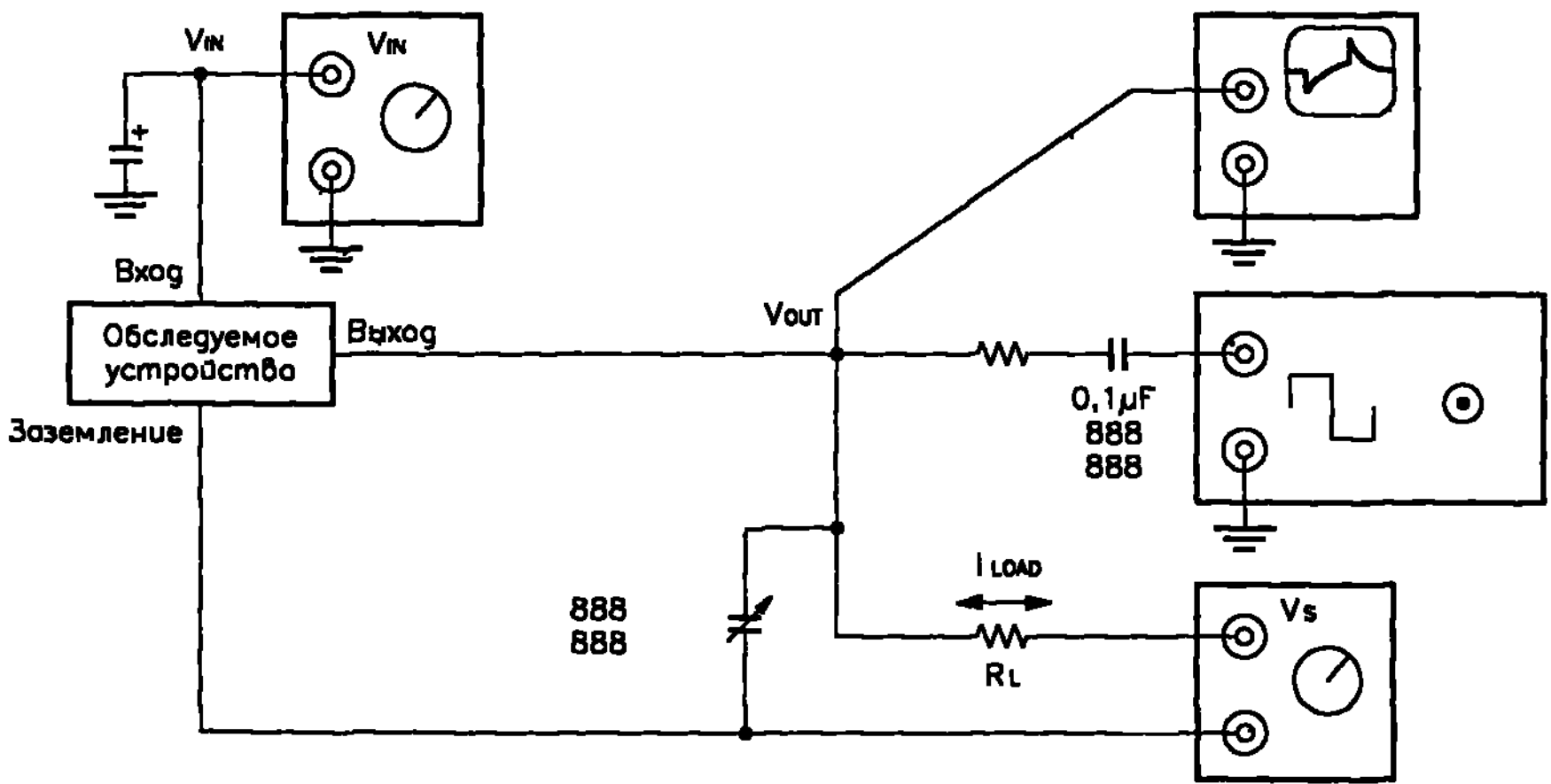


Рис. 8.9. Примерная схема для проверки устойчивости спроектированного устройства

8.9. Самовозбуждение операционных усилителей

Одна из наиболее серьезных проблем, которые могут возникнуть при работе с операционными усилителями, – самовозбуждение. Если можно сделать генератор на базе любого усилителя или устройства с определенным усилением, то придется согласиться, что любой блок усиления может начать возбуждаться тогда, когда вам этого не нужно. Операционные усилители не являются исключением. К счастью, в настоящее время большинство операционных усилителей работают достаточно надежно и стабильно, а для того, чтобы избежать самовозбуждения, необходимо соблюдать четыре простых правила.

Первое. К каждой шине питания всегда необходимо подключать конденсатор – сглаживающий и развязывающий фильтр, устанавливая его вблизи от корпуса или кристалла операционного усилителя. Для повышения качества работы высокочастотных операционных усилителей развязывающие конденсаторы в таких устройствах лучше устанавливать очень близко к выводам операционного усилителя. При создании высокочастотных устройств могут понадобиться и керамические, и танталовые развязывающие конденсаторы. Развязывающие конденсаторы используют для того, чтобы оптимально спроектировать надежно работающее устройство.

Второе. Следует избавиться от ненужных емкостей в цепи нагрузки. Лишняя емкость может вызвать появление дополнительного фазового сдвига при работе операционного усилителя, что, в свою очередь, станет причиной «звона» или самовозбуждения схемы. Эти эффекты особенно наглядны, если подключить к схеме щуп 1:1 осциллографа, коаксиальный или другой экранированный кабель для того, чтобы передать выходной сигнал операционного усилителя на вход другой схемы. В результате этого емкость выходной цепи может значительно возрасти. Если нет уверенности, что операционный усилитель сохранит стабильность при такой нагрузке, то лучше использовать дополнительные корректирующие цепи. Немного времени нужно, чтобы проверить схему с операционным усилителем прямоугольными сигналами или импульсами и понять, «звенит» выходной каскад или нет. Проверять операционный усилитель следует при положительном и при отрицательном выходном напряжении, так как многие операционные усилители с выходами, использующими ррр-повторители, менее стабильны при отрицательном выходном напряжении или если в выходной каскад втекает большой ток. Рекомендую заглянуть в раздел «Принцип Пиза».

Существуют исследования, в которых делалась попытка предсказать эффекты, вызываемые емкостной нагрузкой в чисто активной цепи нагрузки операционного усилителя. Насколько мне известно, все эти исследования оказались пустой тратой времени. Дело в том, что выходное сопротивление операционного усилителя обычно содержит *не только* активную составляющую. А в случае, когда на высоких частотах значение выходного сопротивления невелико, его индуктивная составляющая чаще всего возрастает – именно тогда, когда нужно малое сопротивление. В противоположность этому некоторые операционные усилители (например, NSC LM6361) на низких частотах обладают высоким выходным сопротивлением, которое на высоких частотах снижается, то есть имеет емкостной характер. Таким образом, при добавлении емкостей к выходной цепи операционный усилитель просто слегка «замедляется» и не сильно изменяет фазу. Однако если операционный усилитель работает на удаленную низкоомную нагрузку, сопротивление которой равно волновому сопротивлению кабеля, то согласованный кабель на всех частотах будет представлять собой чисто активное сопротивление и подключение емкостной нагрузки проблем не вызовет.

Емкостные нагрузки инвертора и интегратора можно разделить так, как показано на рис. 8.10. Если тщательно подобрать компоненты, то любой операционный усилитель сможет работать на любую емкостную нагрузку в диапазоне 100 пФ – 100 мкФ. Усиление по постоянному току и по низким частотам стабилизируется

полностью, однако, если емкость нагрузки становится действительно большой, операционный усилитель замедляется, что в конце концов затрудняет процесс управления большими нагрузками. Хорошими начальными значениями для элементов схемы считаются $R_1 = 47\text{--}470\text{ Ом}$ и $C_1 = 100\text{ пФ}$. Обычно такие значения подходят для работы с емкостными нагрузками в пределах $100\text{--}20000\text{ пФ}$. Если нужно построить интегратор или повторитель, то понадобятся дополнительные резисторы сопротивлением $4,7\text{ кОм}$ (рис. 8.10d).

В отдельных случаях, например с повторителем напряжения LM110, цепь обратной связи, соединяющая выход с инвертирующим входом, расположена внутри корпуса микросхемы, поэтому недоступна для переделки. Тогда можно воспользоваться еще одним приемом, суть которого заключается в подгонке усиления по шумам. Усиление по шумам (определяется как $1/\beta$, где β – коэффициент передачи цепи обратной связи операционного усилителя) получается на входах операционного усилителя относительно величины выходного сигнала.

В частности, для инвертора стандартной конфигурации (рис. 8.11a) коэффициент $\beta = Z_1 / (Z_1 + Z_2)$, следовательно, усиление по шумам равно $N+1$, но его можно повысить (рис. 8.11b).

Предположим, используется схема на операционном усилителе, с малыми шумами и усилением, такая как повторитель с единичным усилением, имеющий единичный коэффициент усиления шума (рис. 8.12a). Для надежной и стабильной работы необходимо, чтобы у операционного усилителя и цепи его обратной связи отсутствовал заметный фазовый сдвиг на частотах, близких к частоте единичного усиления этого операционного усилителя. Если можно повысить усиление по шумам до 4 или 5, то требования к запасу по фазе значительно меньше. Не нужно пятикратно усиливать сигнал. Гораздо легче в пять раз усилить шумы (рис. 8.12b), поддерживая единичное усиление сигнала. Даже при единичном усилении повторитель, с соединенными выходом и инвертирующим входом, может быть защищен – скорректирован, как показано на рис. 8.12 (с и d). Более подробно эта схема была описана мной в 1979 году [2]. Если у вас возникли проблемы с повторителями, смело приступайте к их решению, используя описанные методы, – это не сложнее, чем подключить блок резисторов или потенциометр к уже имеющейся схеме. Может быть, вам будет интересно, что часть из изложенных идей была использована Гленном ДеМишелем (Glenn DeMichele) в статье для раздела Design Idea, за которую в 1988 году он был удостоен премии журнала EDN «За лучшее конструкторское предложение» [3].

Третье. Чтобы избежать самовозбуждения в операционных усилителях общего назначения, я советую установить конденсатор обратной связи параллельно R_F , если, конечно, вы не докажете, что в этом конденсаторе нет необходимости (или что его установка принесет больше вреда, чем пользы). Цель, которую преследует установка этого конденсатора, – предотвратить запаздывание по фазе в петле обратной связи. Подобный метод, безусловно, подходит не для всех операционных усилителей. К примеру, LF357 или LM349 стабильны, даже когда значение коэффициента передачи или усиления по шумам превосходит 10. Установка большого конденсатора обратной связи параллельно цепи обратной связи для этих операционных усилителей была бы серьезной ошибкой, хотя в отдельных случаях

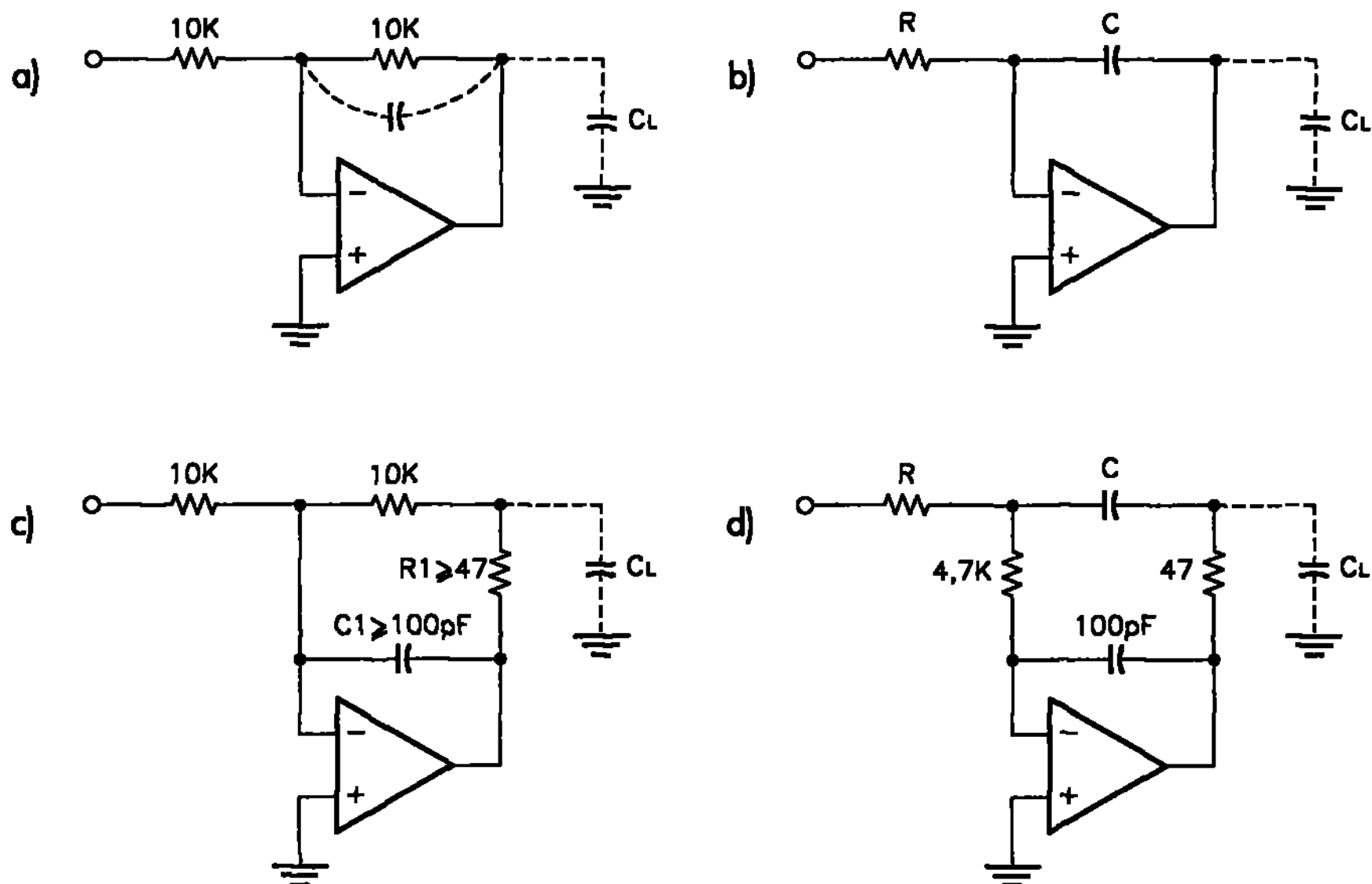


Рис. 8.10. Специальная коррекция ОУ

Базовые инвертор (а) и интегратор (с) можно легко модифицировать для работы на емкостные нагрузки (b) и (d).

конденсатор емкостью 0,5 или 1 пФ не помешал бы...

Не так давно я обратил внимание, что в технических описаниях операционных усилителей, выпускаемых компанией National Semiconductor, рекомендуется использовать следующую формулу для вычисления емкости конденсатора обратной связи:

$$C_F = \frac{C_{in} R_{in}}{R_F}.$$

Однако, если применять обычный операционный усилитель, $C_{in} = 5$ пФ, и инвертор с коэффициентом передачи $-0,1$, у которого $R_F = 1$ МОм, а $R_{in} = 10$ МОм, то в соответствии с этим уравнением вам следовало бы взять $C_F = 50$ пФ и довольствоваться шириной полосы рабочих частот в 3 кГц. Абсурд! Если реально создать такую схему, то окажется, что она отлично работает при $C_F = 1,5$ пФ, что обеспечивает инвертору полосу частот шириной 100 кГц. Вот почему мы полностью отказались от этой формулы и предложили пару других. При тщательной их проверке обнаружилось,

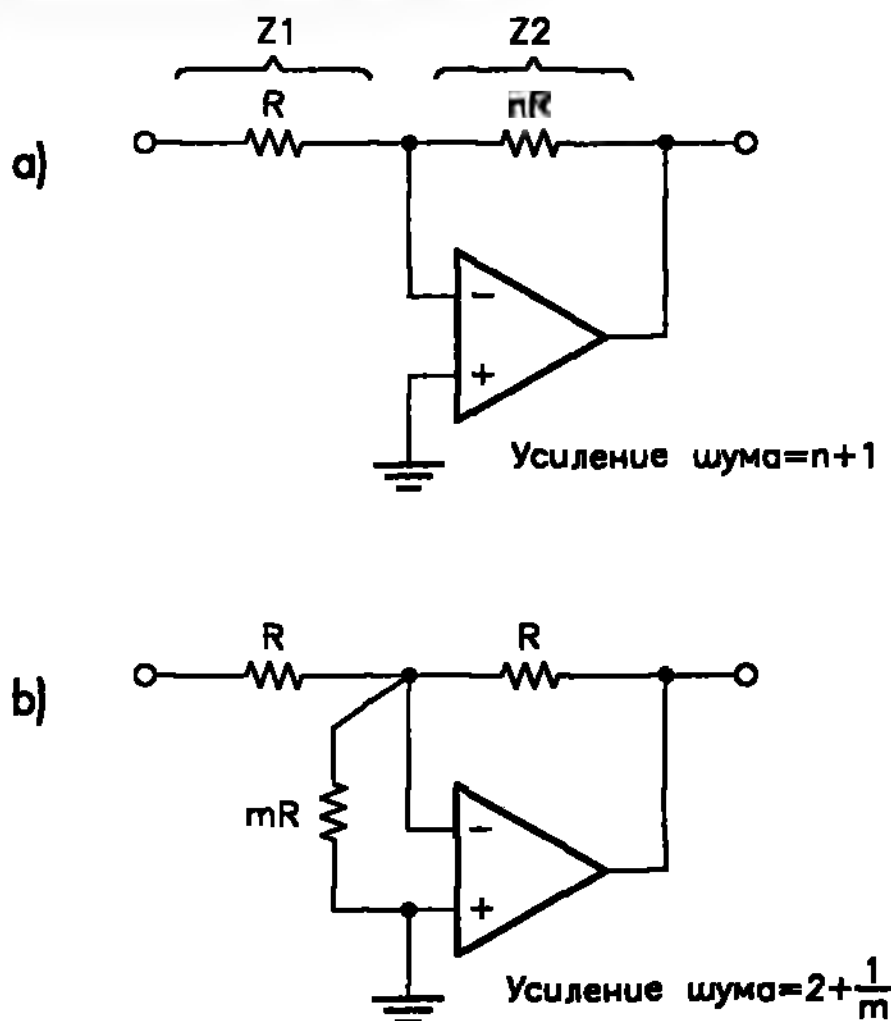


Рис. 8.11. Усиление по шумам

Усиление по шумам стандартного интегратора можно изменить, добавив один-единственный резистор.

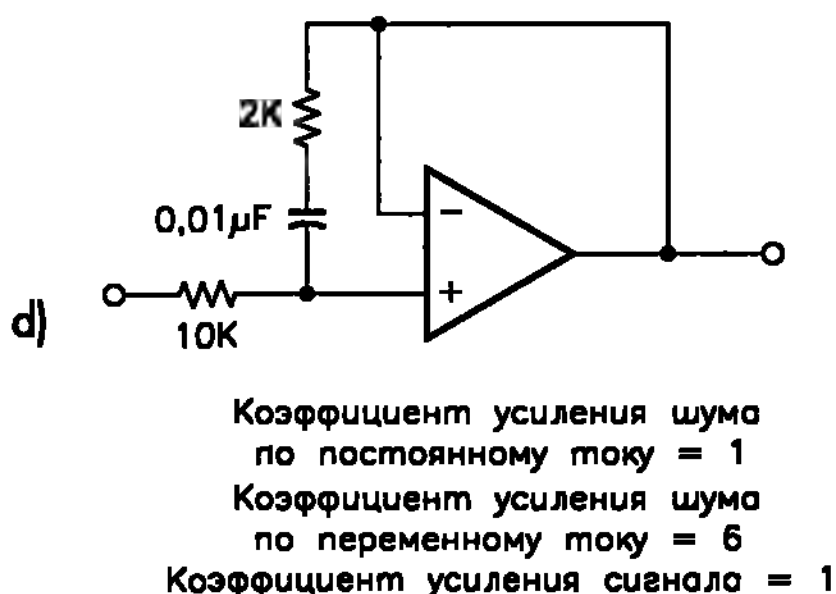
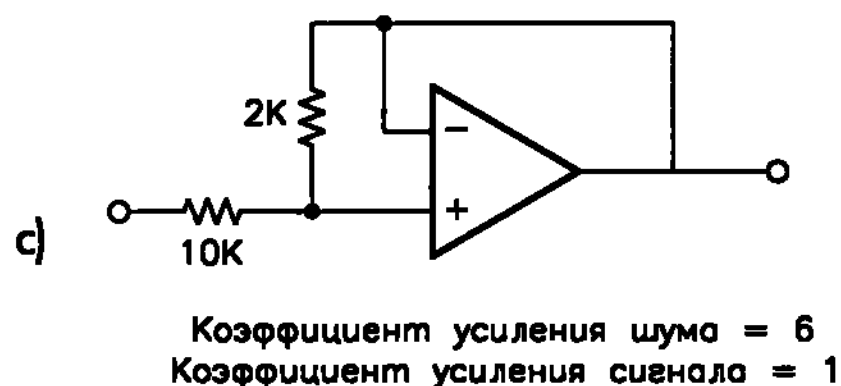
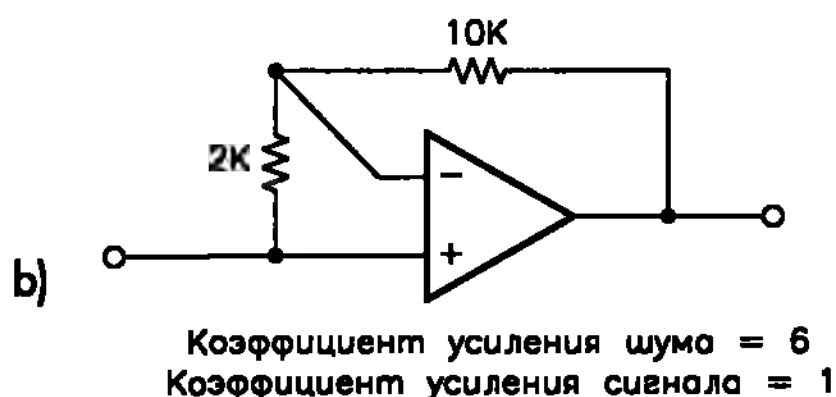
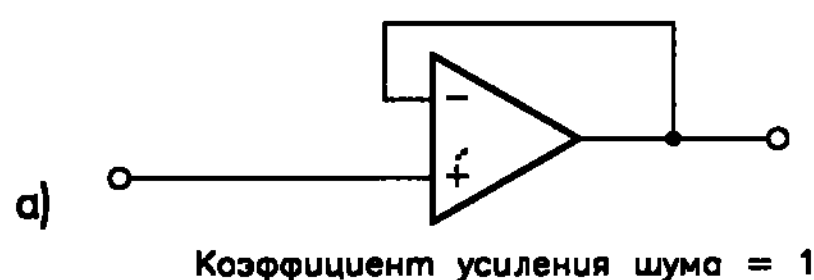


Рис. 8.12. Коррекция повторителей

Откорректировать повторители с единичным усилением можно, изменяя значение усиления по шумам в операционном усилителе и сохраняя неизменным требуемое значение коэффициента усиления при замкнутой петле обратной связи.

что, пользуясь ими, можно получать более широкополосные схемы и исключительную устойчивость.

Для систем с высоким коэффициентом усиления и большим R_F справедливо следующее выражение:

$$C_F = \sqrt{\frac{C_{in}}{GBW \times R_F}},$$

где GBW – произведение коэффициента усиления на полосу пропускания.

В случаях, когда усиление или сопротивление имеют недостаточно большое значение, то есть

$$1 + \frac{R_F}{R_{in}} \leq 2\sqrt{GBW \times R_F \times C_{in}},$$

используется следующая формула:

$$C_F = \frac{C_{in}}{\left(2 + \frac{2R_F}{R_{in}}\right)}.$$

Я не собираюсь осложнять вам жизнь математикой, но эти уравнения – выстраданное выражение аналитических оценок, которое формировалось в течение 20 лет (я занимался их исследованием еще в компании Philbrick Researches).

Но это не означает, что вычисление C_F и установка конденсатора соответствующей емкости решат все проблемы. Полученное значение – всего лишь отправная точка для дальнейших поисков. Обязательно нужно собрать и отладить схему, а потом протестировать ее на перегрузку, «звон» и отсутствие самовозбуждения. Если выходит, что необходимо использовать конденсатор емкостью 1 пФ, а удастся получить «чистый» отклик только при емкости 10 пФ, то можно усомниться в формуле. Учтите, что при переходе от макета к печатной плате паразитные емкости могут измениться до такой степени, что придется повторно проверять параметры C_F . Иногда, если емкость 0,5 пФ будет учтена в конструкции платы, отдельного конденсатора не понадобится. В любом случае вовсе не обязательно слепо верить моим уравнениям – постройте макет, поэкспериментируйте с различными значениями C_F и подберите его самостоятельно. Не согласны со мной – сделайте сами и проверьте.

Четвертое. Когда вы сочтете, что с вашей схемой все в порядке, то есть самовозбуждения в ней нет, все-таки проверьте ее на соответствие принципу Пиза, чтобы окончательно убедиться в ее быстродействии и стабильности при любых мыслимых условиях работы, нагрузках или смещении.

8.10. Шумы: теория и практика

Еще одна проблема, с которой можно столкнуться, используя операционные усилители, – шум. У большинства операционных усилителей проявление шумов хорошо прогнозируется. Часто они предельно малы на теоретических уровнях, особенно в области звуковых частот. В книге Томаса Фредериксена (Thomas Frederiksen) отлично рассказано о шумах и об их особенностях в различных устройствах [4]. Кроме того, если стоит задача оптимизировать шум для какого-нибудь заданного выходного полного сопротивления источника сигнала, в книге “Linear Applications Note AN222” [5] (руководства по применению) корпорации National Semiconductor можно найти полезные советы, так же как и в статье [6].

Проблемы шума возникают, когда их невозможно предсказать или же если перед нами операционный усилитель редко встречающегося типа, обладающий переменными характеристиками по шумам. Шумы почти не проявляются на высоких частотах, однако их спорадическое возникновение весьма вероятно на низких частотах, к примеру при 10, 100 Гц или ниже. Каждый изготовитель транзисторов и усилителей старается удержать их уровень шумов невысоким, но время от времени отдельные партии оказываются сильно шумящими. Иногда у изготовителя есть возможность дополнительного выходного контроля, при котором выявляются сильно шумящие элементы. Однако такие испытания далеко не дешевые: даже если для их проведения требуется всего 1 с работы испытательного стенда или установки, общая стоимость может составлять \$0,03 и более. Мы пытаемся внедрить тесты продолжительностью 0,3 с для некоторых наиболее популярных усилителей, выпускаемых нашей компанией, но тривиально простой эту задачу не назовешь.

Вот вам совет – испытание уровня шума по среднеквадратичной величине является пустой тратой времени. Пиковый уровень шумов усилителей, наличие

шумов у которых оспаривается, гораздо выше, чем можно было бы предположить по результатам тестирования на среднеквадратичный уровень. Так что метод, лучше всего позволяющий выявить шумящие элементы, – тестирование на пиковое значение шумов. Максимальной чувствительности мы добились в полосе 30 Гц – 3 кГц, после того как отфильтровали широкополосные шумы. Тест длительностью 0,1 с дает отличные результаты: элементы, выдерживающие проверку за 0,1 с и не выдерживающие испытание длительностью 0,5 с, попадают очень редко.

8.11. Дробовой шум

Фликкер-шум, известный как шум $1/f$, – это шум переменного тока, наблюдаемый на низких частотах. Еще более коварным, чем шум $1/f$, является дробовой шум. Этот тип электронного шума образуется в результате случайного наложения прямоугольных выбросов на обычный тепловой шум. Дробовой шум в наше время встречается редко, но пока не с нулевой вероятностью. Ему подвержена даже продукция лучших изготовителей, несмотря на жесточайший контроль чистоты производства. Как-то меня жестоко критиковали за то, что у некоторых из разработанных мной усилителей уровень шумов очень высок по сравнению с устройствами конкурентов. Изучив данные и диаграммы, описывающие работу устройств конкурентов, я обратил внимание на оставшиеся незамеченными фликкер-шумы и дробовой шум. Мы пытаемся выявить шумящие экземпляры среди высококачественных элементов. Однако если у нескольких элементов всплески дробового шума следуют с интервалами в 2–10 с, то выявление подобного брака экономически неэффективно. Среди наших покупателей найдется только небольшой процент тех, кто отказался бы принять устройство с подобным дефектом и был бы готов оплатить тестирование всех необходимых ему элементов. Не стоит забывать, что время – деньги: 10 с тестирования стоят \$0,3.

Невзирая на то, что самовозбуждение и шумы, возможно, самые распространенные проблемы, встречающиеся при работе с операционными усилителями, существует еще целый «букет» параметров, на которые необходимо обращать внимание. Среди них можно выделить восстановление после перегрузки или короткого замыкания, время установления сигнала и реакцию на изменения температуры. Многие операционные усилители довольно быстро восстанавливаются после перегрузок, когда выходное напряжение возрастает «до упора», – это происходит, если напряжение выходного сигнала близко к напряжению питания. Для большинства операционных усилителей подобная характеристика не определена или не указывается. Недавно рекламировался один операционный усилитель, при этом сообщалось, что ему требуется всего 12 нс на восстановление после перегрузки. Практически все остальные операционные усилители восстанавливаются на один-два порядка дольше. Время восстановления усилителей, стабилизируемых прерыванием, может достигать до *нескольких секунд*.

Даже при использовании быстродействующего операционного усилителя, у которого задержка не выходит за разумные пределы, отдельным схемам, к примеру интеграторам, все равно требуется много времени для восстановления после перегрузки на входах и выходах. Чтобы избежать этого, можно применить схему

обратной связи со стабилитронами или диодами других типов [7]. Однако если речь идет о дифференциальном усилителе, то применить ограничители на стабилитронах в цепи обратной связи не удастся. Я вспомнил случай, когда, разрабатывая детекторную схему, использовал быстродействующий операционный усилитель с диэлектрической изоляцией. Пришло время запускать его в производство, и оказалось, что производитель переработал кристалл, сократив его размеры на 50%. Так получилось, что *новая улучшенная технология* изготовления кристалла привела к *увеличению времени* восстановления операционного усилителя после перегрузки. Закончилось все тем, что схема была переделана под LM709.

8.12. Техническая документация

Не основывайте свои расчеты на характеристиках и параметрах, значения которых не документированы или соблюдение которых изготовитель не гарантирует. Весьма вероятно, что вы протестируете несколько образцов и они будут обладать свойствами, не документированными производителем. Однако, если элементы из следующей партии не подтвердят возлагаемых на них надежд, на кого в таком случае обижаться? Не сердитесь на меня, ведь я вас только предупреждаю. Работа в любых недокументированных режимах может привести к тому, что результаты тестирования будут значительно отличаться от гарантированных в технических условиях параметров. Если необходимо использовать режимы, параметры которых выходят за определенные в технических условиях границы, то в качестве страховки следует иметь запас заранее отобранных высококачественных интегральных микросхем или приборов. Если новая партия не пройдет разбраковку, то будет хотя бы несколько запасных устройств. Мне вспоминается жалоба одного клиента, использовавшего интегральные транзисторные матрицы LM3046. Часть из них не работала достаточно точно в схеме логарифматора с широким динамическим диапазоном. При коллекторном токе 50 пА у «неисправных» транзисторов $\beta = 20$ против 100 у «исправных». Я убедил пользователя в том, что хранить несколько сотен этих недорогих деталей в надежном месте (например, в сейфе) было бы дешевле, чем заставлять производителя отсортировывать элементы с высоким коэффициентом усиления.

Операционные усилители и другие линейные интегральные схемы могут давать сбои, обусловленные температурными «хвостами», которые появляются, когда изменение температуры выходного транзистора приводит к тому, что на кристалле возникает область резкого перепада температур. Такое изменение происходит постепенно, часто в течение нескольких миллисекунд, и вызывает неравномерный нагрев входных транзисторов или других высокочувствительных каскадов. Множество силовых устройств и прецизионных микросхем, таких как LM317, LM350, LM338, LM396, LM333 и LM337, в течение нескольких лет тестировали с целью обнаружения сбоев и отказов, вызываемых изменениями температуры. Эти испытания проводились не только с силовыми интегральными схемами, но и с прецизионными источниками опорного напряжения типа LM368 или LM369 и с операционными усилителями инструментального (приборного) класса. В статье одного инженера [9] говорится о том, что тепловые «хвосты» могут являться основной

причиной ошибок в работе быстродействующих усилителей сигналов, но с помощью новейших разработок и схемотехники можно минимизировать ошибки, связанные с восстановлением после перегрузки.

Если вы когда-нибудь занимались исследованием погрешностей коэффициента усиления в устаревших операционных усилителях типа ОР-07, то, вероятно, заметили, что и эти погрешности, и нарушения линейности были связаны с температурными проблемами, возникающими из-за неудачно разработанной топологии кристалла. В настоящее время топология кристалла большинства операционных усилителей типа ОР-07 улучшена, и искажения, вызываемые температурными явлениями, отсутствуют.

Еще одной характеристикой, о которой не часто вспоминают и значение которой не приводится в технических описаниях, является зависимость напряжения смещения от механических нагрузок. Влияние этого параметра особенно заметно в операционных усилителях с полевыми транзисторами (технология BIFET), так как полевые транзисторы более чувствительны к механическим напряжениям в кремниевом кристалле, чем биполярные. Если установить и распаять на печатной плате операционный усилитель в пластмассовом корпусе DIP, а затем, контролируя V_{OS} , слегка согнуть плату, можно заметить изменение этого напряжения. Некоторые усилители работают лучше других. Очень многое зависит от того, как спроектирован кристалл, и от того, как кристалл закреплен в корпусе. Если необходимо получить минимально возможное смещение нуля, то следует проверять именно это. Воздействие вибрации на плату может привести к искажениям на переменном токе и к появлению дополнительного шума, обусловленного микрофонным эффектом. Усилители в керамических корпусах DIP имеют более надежную керамическую основу, при их использовании эта проблема не столь актуальна.

Но возникают ситуации, когда вибрация очень опасна. Малогабаритный корпус типа SO операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе в сравнении обычным корпусом DIP выдерживает меньшие механические нагрузки, в результате кристалл микросхемы подвергается значительной деформации, а изменения V_{OS} достигают еще больших значений. Если вы считаете, что, перейдя к использованию корпусов типа SO, можно увеличить число устанавливаемых на плату элементов, то знайте – за это придется «припаять» и потенциальную неприятность. На макетной плате выявить эту неприятность не всегда удастся. Необходимо проверять опытные образцы устройств на реальных печатных платах.

В настоящее время полупроводниковые интегральные операционные усилители практически всех производителей могут выдерживать короткое замыкание выхода на «землю». (Защита в усилителях на гибридных интегральных схемах часто не ставится.) Однако не всегда ясно, выдержит ли операционный усилитель замыкание на положительную или отрицательную шины питания, а если выдержит, то насколько долго. Можно попробовать запросить ответ у изготовителя, и вероятнее всего, что в той или иной форме он будет отрицательным. Вас предупредят о необходимости избегать нагрева устройства до температуры, превышающей абсолютный максимум температуры его рп-переходов. Даже если усилитель или стабилизатор быстро восстанавливаются после прохождения по ним максимального тока, никто не сможет гарантировать, что устройство не начнет «звенеть»,

когда по нему протекает максимальный ток. И изготовитель вряд ли много знает о том, как схема восстанавливается после температурных перепадов, вызванных протеканием максимальных токов. Не стоит требовать, чтобы операционный усилитель, выдержавший перегрузку от тока большой силы, очень быстро полностью восстанавливал работоспособность. Реально, на что можно рассчитывать, – это восстановление усилителя без потери надежности.

В кристаллы некоторых операционных усилителей (типа LM12 или LM10), большей части стабилизаторов напряжения и других силовых интегральных микросхем встраивают каскады защиты от перегрева. Схемы, отключающие устройство при перегреве, могут повысить надежность его работы.

Если устройство длительное время подвергается большой перегрузке, отсутствует отвод тепла или вокруг слишком жарко, то в тот момент, когда температура кристалла переваливает за 150°C , механизм защиты отключает выходной сигнал. Схемы ограничения температуры кристалла в LM117 и в других ранних моделях силовых интегральных микросхем иногда просто снижали выходной ток до безопасного по постоянному току уровня так, чтобы температура кристалла примерно равнялась 160°C . В остальных случаях, когда нагрузка меньше и градиент температуры непостоянен по времени, ограничители температуры начинают включать/выключать схему с такой скважностью, что температура кристалла также не превысит 160°C . Закончив разработку микросхемы LM137, я пришел к выводу, что характеристики предыдущего устройства были лучше, поэтому я предусмотрел в схеме защиты от перегрева небольшой, приблизительно в 5°C , гистерезис. Таким образом, схема пыталась перезапустить мощную нагрузку с частотой повторения около 100 Гц. Если схема стабилизатора рассчитана только на обычный выход на режим при включении питания, то, возможно, после перегрузки не получится перезапустить стабилизатор даже при некоторых штатных нагрузках.

Таким образом, возникновение релаксационных колебаний в схеме ограничения температуры кристалла запланировано, но никто не побеспокоился о том, чтобы отразить это в технических условиях. Вот еще одно напоминание о моей любимой мозоли – некачественной технической документации. Поэтому я из всех сил стараюсь сделать все для того, чтобы она была правильной, полной и понятной. Вам же рекомендую ознакомиться с разделом «Как читать технические описания» (см. приложение F [10]).

8.13. Методы исправления ошибок

Теперь, когда вы знаете, как выявлять отдельные неисправности, связанные с операционными усилителями, продумайте свои шаги при ремонте реальной схемы с операционным усилителем. Обычно я разделяю план действий на две части: относящуюся к проблемам по постоянному току и относящуюся к проблемам по переменному току. К характерным примерам отказов по переменному току относятся самовозбуждение и звон; к неприятностям, вызванным постоянным током, – серьезные погрешности в выходном сигнале по постоянному току и «залипшие» выходные сигналы, то есть провалы выходного сигнала либо на положительной, либо на отрицательной шине питания. Чтобы убедиться в том, что схема

не самовозбуждается, нужен осциллограф. Меня всегда возмущает, если выясняется, что у клиента, которому я пытаюсь помочь, *нет даже осциллографа*. Я понимаю, что у инженера может быть только примитивный осциллограф. Однако существует ряд проблем, от решения которых при отсутствии хоть какого-нибудь осциллографа придется отказаться вообще – нет возможности проверить схему.

Когда проблема относится к неполадкам по переменному току, я сначала проверяю, как ведут себя входные сигналы и имеют ли они именно те параметры, которые мне нужны. После этого я последовательно цепляю щупы осциллографа на все узлы и выводы схемы. В одних случаях лучше пользоваться щупом 1:10, в других – 1:1. Иногда нужен закрытый вход осциллографа, а иногда – открытый. Проверяю абсолютно все выводы, особенно те, к которым подводится питание. Затем – в зависимости от признаков, которые удалось обнаружить, – я просматриваю все, что есть вокруг, и анализирую симптомы, добавляя конденсаторы либо магазины сопротивлений и емкостей к определенным узлам схемы. Пробую использовать два щупа для того, чтобы посмотреть, нет ли интересных фазовых соотношений между сигналами на выходе и входе, и параллельно с этим контролировать, что на выходе схемы все еще присутствуют колебания.

Часто методы исследования зависят от того, знакома ли мне схема или нет. При возникновении непонятной ситуации я не перехожу к следующей проблеме, пока не разберусь в происходящем. Если я запутался, то обязательно должен выяснить, в чем дело, чтобы потом не повторить своих же ошибок.

Когда при работе операционного усилителя выявляется погрешность по постоянному току или «залипание», в первую очередь я проверяю схему с помощью осциллографа, чтобы убедиться в отсутствии самовозбуждения. После этого достаю пятиразрядный цифровой вольтметр и составляю карту напряжений на копии принципиальной электрической схемы. Сначала я пытаюсь просто удержать все цифры в голове и быстро выполнить диагностику очевидных неисправностей – некачественный источник питания, отвалившийся провод заземления или же отсутствующий резистор. Если этого недостаточно, стараюсь тщательно все записывать, это помогает в поиске неисправностей. Глядя на схему, пробую решить, какой отказ мог привести к возникновению именно этих ошибок.

Резистор не того номинала? Замыкание? Обрыв? Затем пытаюсь придумать тест для подтверждения гипотезы. Иногда приходится отсоединять радиодетали, но такую работу я стараюсь свести к минимуму, добавляя резисторы, изменяя ток или напряжение, что часто дает тот же результат.

Если схема усилителя вообще не работает, то иногда лучше всего «внедриться» в нее непосредственно, «перехватить» один из входов усилителя и принудительно поменять на нем напряжение относительно другого входа этого же усилителя. Когда никакого влияния на выходной сигнал не происходит, значит, либо усилитель «помер», либо он плохо подключен, либо это усилитель с «залипшим» выходом. Применение теста, при котором разрывается цепь обратной связи, совсем не очевидно – ни в одной книге подобных рекомендаций нет. Но после того, как вы попробуете им воспользоваться, наверняка согласитесь, что по его результатам можно четко определить источник проблем.

Более детально методы поиска неисправностей в основных схемах на операционных усилителях и комментарии к ним изложены в главе 14. Многие из этих методов могут быть полезны также и при поиске неисправностей в схемах на других элементах.

В следующей главе мы обсудим буферные схемы, повторители, компараторы и другие подобные устройства.

Литература

1. *Data Converter Handbook*, Analog Devices, P.O. Box 9106, Norwood MA 02062, 1974.
2. Pease, Robert A., "Improved unity-gain follower delivers fast, stable response", *EDN*, February 20, 1979, с. 93. (Также входит под рубрикой LB-42 в книгу "NSC's Linear Applications Book", 1980, 1986 и т. д., "Get Fast Stable Response from Improved Unity-Gain Followers".)
3. DeMichele, Glenn, "Compensate op amps without capacitors", *EDN*, July 21, 1988, с. 331.
4. Frederiksen, Thomas M., *Intuitive Operational Amplifiers*, McGraw-Hill, New York, NY, 1985. Книгу можно приобрести в Heath Company, P.O. Box 8589, Benton Harbor, MI 49022. (800) 253-0570 (Part No. EBM-1).
5. Nelson, Carl T., *Super Matched Bipolar Transistor Pair Sets New Standards for Drift and Noise*, Application Note AM-222, Linear Applications Databook, с. 517, National Semiconductor, Santa Clara, CA, 1986.
6. Pease, Robert A., "Low-noise composite amp beats monolithics", *EDN*, May 5, 1980, с. 179. (Также входит под рубрикой LB-52 в книгу "NSC's Linear Applications Databook", 1982, 1986, 1989 и т. д., "A Low-Noise Precision OP Amp".)
7. Pease, Robert A., "Bounding, Clamping techniques improve on performance", *EDN*, November 10, 1983, с. 277.
8. Pease, Bob и Ed Maddox, "The Subtleties of Settling Time", *The New Lightning Empiricist*, Teledyne Philbrick, Dedham, MA, June 1971.
9. Addis, John, "Versatile Broadband Analog IC", *VLSI Systems Design*, September 1988, с. 18.
10. Pease, Robert A., "How To Get The Right Information From A Datasheet", *EE Times*, April 29, 1985, с. 31. (Также издана как приложение F к книге "NSC's General-Purpose Linear Devices Databook", 1988, 1989 и т. д. и в качестве приложения F к этой книге.)

9. ПОДАВЛЕНИЕ ПАРАЗИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Самовозбуждение – вечная проблема аналоговых устройств и систем. Самовозбуждаются операционные усилители (о которых рассказывается в главе 8), транзисторы, импульсные стабилизаторы, оптопары, компараторы и повторители. Можно сказать, что защелкивание схемы является полной противоположностью самовозбуждению, но его я тоже отношу к рассматриваемой проблеме.

Конечно, у меня нет возможности рассказать вам о том, как решать все вопросы, связанные с проблемой самовозбуждения. Мы рассмотрим ряд общих принципов, а затем обсудим конкретные неприятности, которые могут произойти с различными радиоэлементами аналоговых схем, в том числе с компараторами и буферами. Такая информация, дополненная рекомендациями по порядку работы и применению измерительных приборов, наверняка позволит вам успешно начать деятельность в этой области.

Перечислим отдельные типы паразитных колебаний, с которыми вы можете неожиданно столкнуться:

- самовозбуждение на очень высоких частотах порядка сотен мегагерц, вызываемое отдельным самовозбуждающимся транзистором;
- самовозбуждение на частотах порядка десятков мегагерц, вызываемое паразитной обратной связью в компараторе;
- самовозбуждение на частотах порядка сотен килогерц, вызываемое неправильной коррекцией операционного усилителя с замкнутой петлей обратной связи, использованием нештатного режима работы интегрального стабилизатора напряжения или недостаточной развязкой по цепям питания;
- самовозбуждение импульсного стабилизатора на средних частотах, вызываемое неправильной коррекцией АЧХ контура регулирования;
- генерация на частотах 50 Гц или 100 Гц, а также самовозбуждение на других частотах, кратных частоте питающей сети;
- самовозбуждение на низких частотах, вызываемое наличием физических задержек в электромеханических или термических цепях обратной связи или контурах регулирования.

Как следует из приведенной общей классификации, частота самовозбуждения четко указывает на ее причину. Система автоматического регулирования с электромоторами не может самовозбуждаться на частоте 10 МГц, а отдельно взятый транзистор – на частоте 100 Гц (в нормальных условиях). Так что первый вопрос, который я задаю жалующемуся на самовозбуждение инженеру, звучит так: «А на какой частоте это происходит?» Несмотря на то что частота самовозбуждения нередко является хорошей подсказкой, инженеры часто даже не могут определить ее. Такая ошибка обычно приводит к тому, что помочь им по телефону очень непросто.

На возможность возникновения самовозбуждения на очень высоких частотах – от 20 до 1000 МГц – большое влияние оказывает топология и взаимное расположение элементов схемы. Один из методов поиска неисправностей заключается в том, чтобы поводить пальцем вокруг элементов схемы и смотреть, нет ли положения, в котором самовозбуждение усиливается или ослабевает. Надо учитывать, что информация о том, при каких условиях самовозбуждение усиливается, не является излишней и может оказать помощь в решении проблемы.

Я помню, насколько большое впечатление произвела на меня продемонстрированная моим коллегой тенденция к самовозбуждению на частоте 98 МГц при определенных уровнях выходного напряжения, которая наблюдалась у ряда первых операционных усилителей.

Если к этому операционному усилителю подносился ГИР и частота его колебаний была близка к 98 МГц, то было отмечено увеличение или уменьшение склонности к самовозбуждению. (Фирма Heathkit производит одно из устройств подобного рода, иначе его называют ГИР-волномер, подробнее об этом см. в главе 2.) В то время у меня не было осциллографа с полосой рабочих частот до 100 МГц, имелся только с полосой 25 МГц, но на экране я мог наблюдать за огибающей этого высокочастотного самовозбуждения после его выпрямления. Иными словами, если вы замечаете, что режим работы вашей схемы по постоянному току изменяется только из-за того, что вы подносите к транзистору палец, то у вас должно возникнуть подозрение о наличии в схеме паразитных высокочастотных колебаний.

Разумеется, не следует использовать этот прием в схемах с высоким и тем более с опасным для жизни напряжением.

Самый простой способ вызвать самопроизвольные сверхвысокочастотные колебания – включить транзистор эмиттерного повторителя (даже если это хороший и очень надежный транзистор типа 2N3904) в режиме с эмиттерным током порядка 5–10 мА. При таких условиях быстро возникает самовозбуждение на частоте в несколько сотен мегагерц. И хотя высококачественный 100-мегагерцевый осциллограф не позволяет выявить колебания такого рода, это самовозбуждение вызывает радиошум, под воздействием которого другие каскады устройства могут стать «Иванами, не помнящими родства», а вся система в целом не пройти испытания на электромагнитную совместимость и допустимый уровень излучения радиопомех.

Например, в ходе разработки первых персональных компьютеров понадобилась схема, позволяющая производить СБРОС (RESET) процессора. Многие разработчики (видимо, абсолютно независимо друг от друга) решили использовать

простую, самую дешевую схему СБРОСА (см. рис. 9.1). После того как разработки блоков завершились, компьютеры были переданы для сертификации в Федеральную комиссию связи США (ФКС). Ни один из представленных вариантов компьютеров соответствующих испытаний не прошел. Почему? Причиной всему оказался маленький транзистор, который самовозбуждался на очень высокой частоте, так как его рабочий ток превышал 10 мА, а его база была заземлена через развязывающий конденсатор. Частота колебаний получилась столь большой, что ни один из разработчиков их не обнаружил, но испытатели из ФКС заметили, так как транзистор излучал в эфир достаточно мощные колебания на частотах до нескольких сотен мегагерц. В итоге компьютеры не смогли пройти испытания на допустимый уровень излучения радиопомех. Всем пришлось заново браться за работу и исправлять допущенные ошибки. Нравится ли вам эта история?

Возвращаясь к схеме эмиттерного повторителя, скажем, что угольный резистор сопротивлением 50 или 100 Ом, включенный последовательно в базовую цепь транзистора в непосредственной близости от него, поможет избавиться от возникновения паразитных колебаний. В некоторых ситуациях вместо резистора лучше использовать небольшую ферритовую бусину, надеваемую непосредственно на вывод базы транзистора, – она в меньшей степени влияет на частотные характеристики.

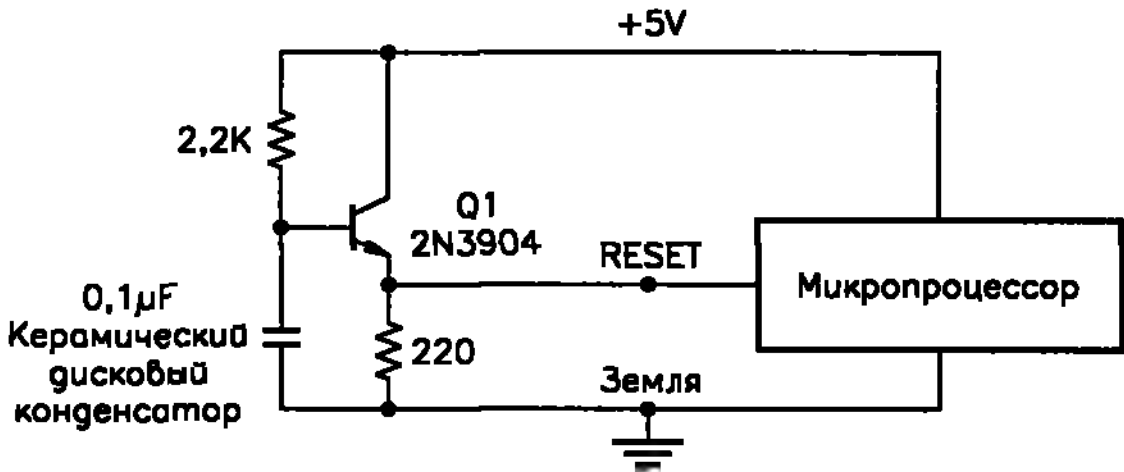


Рис. 9.1. Первая в мире схема начальной установки

Так выглядела «популярная» схема каскада, использованного для выполнения СБРОСА процессора до тех пор, пока инженеры не разобрались в ее отрицательных качествах.

9.1. Внимание! Самовозбуждение

Проблемы возникают не только из-за паразитных высокочастотных колебаний. Нескорректированный контур обратной связи в импульсном стабилизаторе может привести к самовозбуждению на низких частотах. Для поиска неисправностей в цепях обратной связи импульсных стабилизаторов я рекомендую использовать в первую очередь векторный анализатор цепей. Это позволит вам разобраться с проблемами гораздо быстрее. Польза от применения анализатора цепей заключается в том, что он упрощает сбор данных и регистрацию отклонений в работе схемы в случае возникновения проблем. (Однако я предпочитаю доверять переходной характеристике в режиме реального времени. Если она согласуется с амплитудно-частотной характеристикой – замечательно, а если нет, то это становится подозрительным.)

Кроме того, если более старая версия вашего устройства работала хорошо, то тогда в чем же заключается преимущество нового варианта, который работает плохо? Лучше, чтобы у вас всегда был один или несколько экземпляров старой модификации, это позволит вам произвести необходимые сравнения после того, как с новым вариантом возникнут проблемы. (Обратите внимание, я сказал именно «после», а не «если».) И наконец, проверьте элементы (типа конденсаторов), параметры которых на высоких частотах могут оказаться иными, если будут использованы элементы других типов или кто-нибудь воспользуется услугами других поставщиков.

Оптопары – еще один потенциальный источник нескольких причин возникновения самовозбуждения в импульсных стабилизаторах. Это обусловливается широким диапазоном разброса усиления по постоянному току и частотных характеристик. Интегральная микросхема импульсного стабилизатора, наоборот, вряд ли станет причиной самовозбуждения, так как ее граничная частота существенно выше частоты среза петли обратной связи. Тем не менее нельзя быть уверенным в интегральной микросхеме до тех пор, пока не будет неоспоримо доказано, что дело не в ней. Поэтому вам необходимо иметь запасную макетную плату с панелькой, которая будет использоваться исключительно для входного контроля получаемых от разных поставщиков элементов различных типов, а также интегральных микросхем с граничными значениями параметров на предмет вероятности возникновения рассматриваемых проблем. Вам может показаться, что из-за паразитной емкости и индуктивности этих панелек такая проверка принесет больше вреда, чем пользы, но практика свидетельствует, что ценность получаемой информации превышает риск искажений.

9.2. Когда самовозбуждение – не самовозбуждение

До сих пор, приблизительно раз в месяц, кто-нибудь звонит нам с жалобой, что в одной из производимых компанией микросхем или предлагаемых схем их применения возникла генерация на частоте 100 Гц. (Один из наших инженеров не так давно упоминал о таком случае, и я понял, что забыл написать в этой книге о самовозбуждении подобного рода. Вот почему данный раздел был добавлен в текст уже в последний момент. Если бы я так и не вспомнил об этом, то оказался бы в очень неловком положении.) Итак, из-за чего операционный усилитель самовозбуждается на частоте 50 или 100 Гц? Нельзя сказать, что операционный усилитель или стабилизатор *не может* самовозбуждаться на такой частоте, просто это *маловероятно*. На самом деле проблема заключается в том, что в схему попадает помеха с частотой питающей сети. Существует четыре причины, по которым это происходит:

О если к высокочувствительному входу схемы подключен диод, то на него может попадать рассеянный естественный свет, что приводит к появлению фототоков. Если комната освещается лампами дневного света, то такие токи обычно имеют частоту 100 Гц; к ним, наряду с какой-нибудь постоянной составляющей, также могут быть подмешаны и более высокие гармоники. Как только станет ясно, что причина неприятностей именно в этом, то избавиться от подобного самовозбуждения легко – достаточно лучше затемнить схему,

накрыв ее темной тканью или книгой. После этого надо локализовать источник проблем и создать уже более надежное затемнение. Если свет в комнате очень яркий, то он может проникать даже через стеклянные изоляторы в основании корпуса типа ТО-99, маленькие керамические втулки также не совсем матовые – какой-то свет через них все равно проникает внутрь корпуса. К счастью, современные пластмассовые корпуса DIP обеспечивают надежную защиту от света (корпуса коричневого цвета советского производства, наоборот, практически прозрачные – *прим. ред.*);

○ пульсации напряжения источника питания на частоте 50 или 100 Гц (пилообразные или прямоугольные импульсы) могут оказаться больше, чем предполагалось. Причиной этого бывает нарушение качества контактов, плохой или высохший конденсатор, разрыв в схеме выпрямителя или земляная петля. Как и в предыдущем случае, когда станет ясно, *что именно* происходит, поиск и исправление неполадки не вызовет затруднений;

○ ваша схема подвергается воздействию магнитного потока рассеивания какого-нибудь трансформатора. Основными источниками могут быть близко поднесенный к схеме паяльник или силовой трансформатор, который, находясь в режиме, близком к насыщению, имеет вокруг себя сильное магнитное поле. Наведенный таким полем сигнал имеет характерный вид – частотой 50 Гц с примесью многочисленных гармоник и крайне чувствителен к ориентации трансформатора. Эту неприятность также несложно заметить. Но когда обнаружится, что силовой трансформатор не только нагревается, но к тому же является источником сильного магнитного поля, то передвинуть его, если разработка проекта почти завершена, чаще всего бывает не так просто. Я бы посоветовал монтировать схему источника питания в небольшой металлической коробке на расстоянии 0,5–1 м от основной части вашего прибора, хотя это не всегда осуществимо. Для начала следует установить заведомо хороший силовой трансформатор высокого качества, у которого наверняка нет избыточного внешнего магнитного поля и насыщения. Иногда можно модифицировать устройство, используя тороидальный силовой трансформатор. Но эти трансформаторы дороже других подобных устройств, хотя обычно стоят затраченных денег, так как у них выше эффективность и меньше саморазогрев. Теоретически можно попробовать применить экранирование. Если поставить алюминиевую пластинку толщиной 1/16 дюйма, это никакого эффекта не даст, потому что для экранирования магнитного поля требуется использовать железо. Если установить железную пластинку такой же толщины, это тоже не сильно поможет, так как для получения заметного экранирующего эффекта на частоте 50 Гц необходимо использовать стальную пластину толщиной 1/4 дюйма. Возможно, удастся расположить чувствительные участки схемы так, чтобы площади контуров были небольшими, тогда через них будет проходить меньший магнитный поток. Разрабатывая схему, старайтесь использовать аккуратную, компактную топологию, витые пары – наверняка что-нибудь да сработает. Если же никогда ничего подобного раньше не делалось, стоит посоветоваться с более опытными специалистами;

О механическая вибрация может передаваться на схему по свободно свисающему кабелю или через керамический конденсатор группы «большой ТКЕ». Если никто не предупредит о таком факте, то можно оказаться в непростой ситуации. Иногда проблема решается посредством керамического конденсатора группы NP0 или пленочного конденсатора. Не так давно мы проводили измерения с помощью пикоамперметра, и когда кабель питания проходил вблизи точки суммирования, наблюдалось значительное изменение параметров: $Q = C \times V$. В случаях, когда этот кабель вибрировал с частотой сети питания, на вход наводился ток $I = V \times dC / dT$ с частотой 60 Гц. Он исчез, когда мы изолировали шину 5 В от входа, и для того, чтобы уберечься от всех вибраций, снабдили конструкцию амортизаторами.

Есть еще несколько возможностей проникновения шумов с частотой 50 Гц в схему, так что вы должны быть готовы проявить изобретательность, обнаруживая места и причины появления шума. Но если частота самовозбуждения в точности совпадает с частотой питающей сети и синхронизируется при режиме осциллографа «Синхронизация от сети», то мы, несомненно, имеем дело с ненастоящим самовозбуждением. Однако мне уже встречались случаи самовозбуждения на частоте 49 Гц, которое легко можно было по ошибке спутать с частотой сети 50 Гц. Правда, подобные случаи встречаются очень редко. Я просто хотел показать, что существует множество помех, к борьбе с которыми вы должны быть постоянно готовы. Некоторые из этих явлений окажутся реальными самовозбуждениями, а некоторые – ложными.

Для анализа работы медленной системы автоматического регулирования, принципиальная схема которой приведена на рис. 9.2, лучше всего использовать ленточный самописец, так как отработка в системе очень медленная. (В данной ситуации мог бы подойти и запоминающий осциллограф, но я предпочитаю пользоваться ленточным самописцем.) Возможно, вам захочется проанализировать подобную сервосистему с помощью компьютерной программы, например SPICE, но реакция температурного датчика на нагрев зависит исключительно от механической конструкции и тепловой связи упомянутых устройств. Такая система с трудом поддается компьютерному анализу или моделированию.

9.3. Проблемы с компараторами

Представление о компараторе всего лишь как об операционном усилителе, у которого отсутствуют корректирующие конденсаторы, неверно. Компараторы обладают большим коэффициентом усиления напряжения, и у них достаточно большой фазовый сдвиг на высоких частотах. Это означает, что вероятность появления самовозбуждения присутствует постоянно. Фактически большая часть неприятностей, связанных с компараторами, возникает от самовозбуждения.

С низкоскоростными компараторами, например с хорошо известным LM339, проблем не бывает. А если при разработке схемы вы расположили выходы самого компаратора (а также выводы и дорожки всех мощных, скоростных и зашумленных сигналов) подальше от его входов, то довольно часто удастся получить чистый

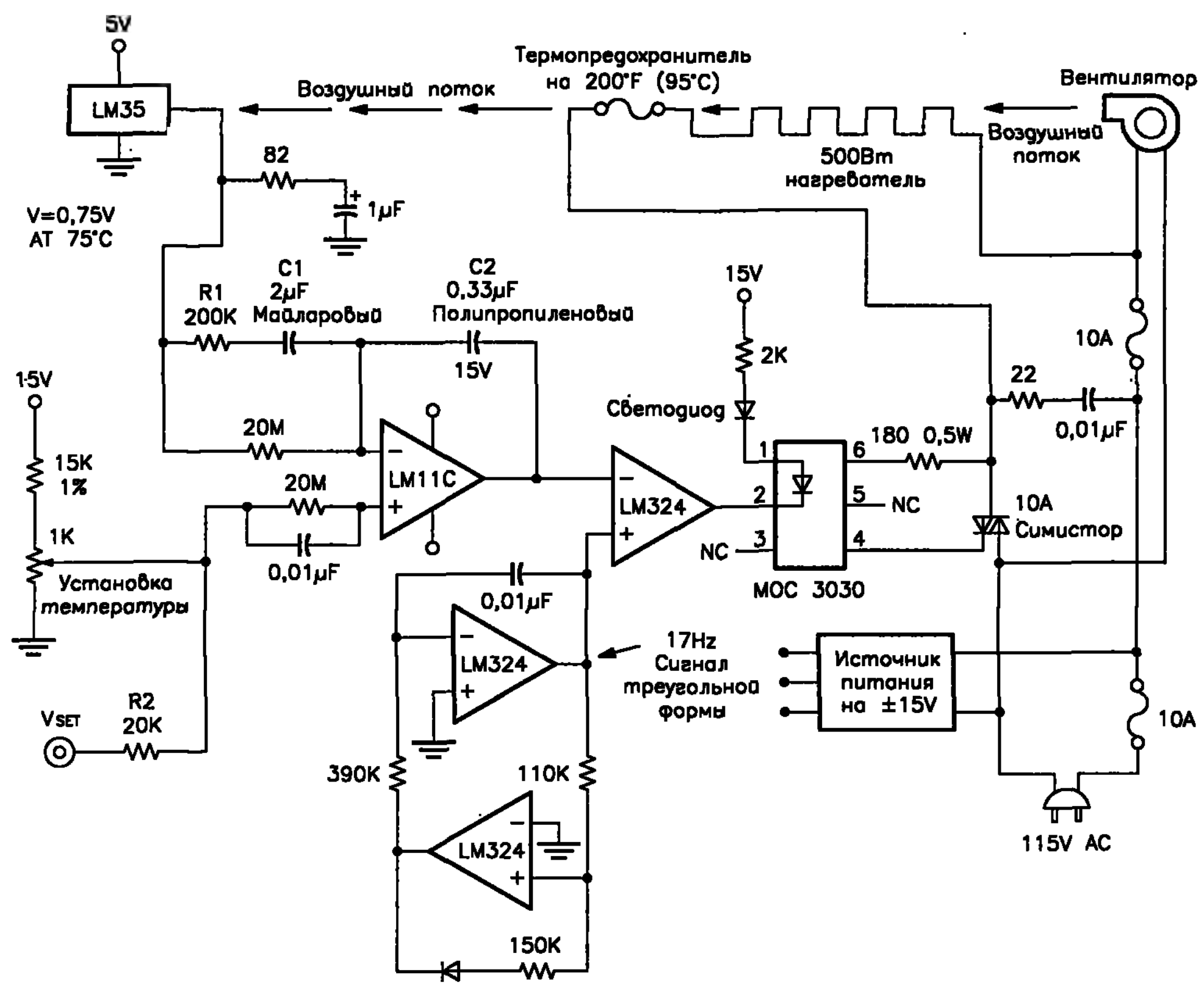


Рис. 9.2. САР для тепловой пушки

Для стабилизации схемы медленной системы автоматического регулирования нагревателя и определения подходящих значений для R1, C1 и C2 потребовалась подача на R2 прямоугольного сигнала V_{SET} напряжением 1 В двойной амплитуды и частотой 0,004 Гц с последующим контролем выходного сигнала микросхемы LM11C посредством ленточного самописца.

выходной сигнал без признаков самовозбуждения или «звона». Несмотря на это, даже при небольших частотах на LM339 может возникнуть самовозбуждение, если вы подадите на его дифференциальные входы медленно меняющееся пилообразное напряжение. Ситуация может усугубиться, когда источники входного сигнала будут обладать высоким выходным сопротивлением (намного больше 10 кОм) или же на плате будет отсутствовать защитное экранирование.

Вообще говоря, в такой ситуации для каждой схемы с компараторами придется обеспечить небольшой гистерезис или положительную обратную связь с выхода компаратора на его неинвертирующий вход.

Я предпочитаю обеспечивать такой гистерезис, величина которого в два-три раза превышает значение, минимально необходимое для предотвращения паразитных колебаний, возникающих вблизи порога переключения компаратора. Создаваемый запас по глубине обратной связи определяет запас устойчивости (более

подробно об этом рассказывается в разделе «Принцип Пиза» главы 8). До сих пор я не встречал в публикациях упоминания о технологии повышения запаса устойчивости компараторов с помощью гистерезиса, думаю, вы впервые читаете об этом на страницах настоящего издания.

Мои советы, касающиеся дополнительного гистерезиса, — всего лишь результат обобщения собственного опыта. В зависимости от того, с каким устройством вы работаете, вам, возможно, понадобится гистерезис еще большей величины. К примеру, компаратор в RC-генераторе может работать с гистерезисом, равным 1, 2 или 5 В, это означает, что у вас всегда есть возможность предусмотреть такую величину, которая значительно превышает установленную мной минимально необходимую ширину защитного гистерезиса. Кроме того, если на сигнал накладывается шум с амплитудой в несколько милливольт, то для компаратора, обрабатывающего такой сигнал, может потребоваться гистерезис, величина которого в два-три раза превышает максимальный пиковый уровень шума.

9.4. Чувствительность компараторов

С компараторами на самом деле нужно обращаться очень аккуратно. Это означает, что, дотронувшись до схемы, в которой они работают, можно существенно изменить ее характеристики. И в силу такой чувствительности компараторов к прикосновениям вам необходимо подготовиться к тому, что при переходе от макета схемы к печатной плате предусмотренный запас устойчивости может измениться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Невозможно предсказать заранее, какой гистерезис понадобится при изменении расположения элементов схемы, так что вам придется заново перенастроить систему после внесения в нее изменений.

У быстродействующих компараторов, таких как LM311, чувствительность к малейшим внешним воздействиям еще выше, а зависимость рабочих характеристик от расположения элементов еще сильнее. Например, многие инженеры-разработчики были недовольны микросхемой LM311, потому что этому компаратору свойственно самовозбуждение. Но я показал, что при надлежащей разработке топологии печатной платы LM311 может усиливать любой слабый сигнал, в том числе и собственный входной шум, при этом самовозбуждения не возникнет и не нужно использовать цепи положительной обратной связи. Работая с LM311, следует придерживаться одного специфического правила: выводы коррекции нуля должны быть замкнуты между собой (обычно это выводы 5 и 6), чтобы предотвратить возникновение паразитной обратной связи по переменному току с выхода этого компаратора (обычно седьмой вывод), так как эти выводы могут рассматриваться в качестве дополнительных входов. В технических описаниях на LM311, включенных в справочник National Semiconductor Linear Databook, с 1980 года содержатся все необходимые советы и предупреждения, и я рекомендую не забывать о них, работая с любыми компараторами.

Во время работы с еще более быстродействующими, чем LM311, компараторами я обнаружил, что, решая проблему самовозбуждения, неразумно и непрактично рассчитывать только на идеальную топологию печатной платы. Для таких

компараторов вам почти наверняка понадобится вводить какой-то гистерезис и, если вы разрабатываете цифровую систему сбора и обработки информации, освоить принципы стробирования или промежуточной фиксации состояний компараторов. Эти методы гарантируют, что непосредственная связь между выходами и входами компараторов не сможет существовать дольше нескольких наносекунд. Вот почему есть надежда, что самовозбуждение будет предотвращено. В данной ситуации может оказаться полезной достаточно мощная развязка по цепям источников питания вместе с правильно разведенной топологией экранированной печатной платы, в которой предусмотрены металлические перегородки, служащие экранами между входными и выходными цепями. Но, скорее всего, вам все-таки понадобится вводить в схему гистерезис той или иной ширины.

В некоторых устройствах специального назначения, вам, возможно, удастся добиться преимущества, вводя либо параллельно, либо вместо обычного гистерезиса по постоянному току цепь положительной обратной связи с гистерезисом по переменному току (см. рис. 9.3). Если получится, например в детекторе перехода через нулевой уровень, удачно подобрать конденсатор обратной связи, вы сможете получить нулевой гистерезис в точке перехода через нулевой уровень, но при этом в остальных точках переходной характеристики гистерезис получится ненулевым. Хитрость заключается в том, чтобы дать конденсатору возможность полностью разрядиться за один полупериод входного сигнала. Однако необходимо проверить, чтобы в компараторе с гистерезисом по переменному току при пропадании входного сигнала не возникало самовозбуждения иного вида.

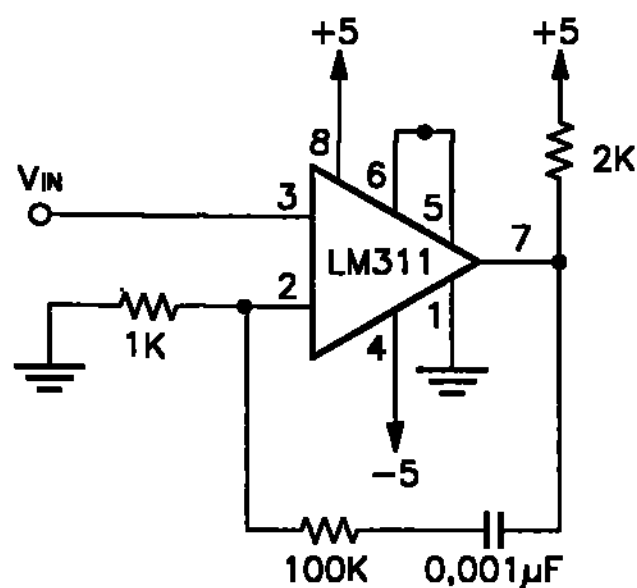


Рис. 9.3. Гистерезис на переменном токе

В данном детекторе перехода через нулевой уровень нет гистерезиса в цепи постоянного тока, а по переменному току используется гистерезис шириной 50 мВ.

9.5. Шумы в компараторах

В большинстве технических описаний ничего не говорится о шумах в компараторах (за исключением новых технических описаний на микросхемы NSC LM612 и LM 615). Но, несмотря на это, вы можете совершенно четко утверждать, что компараторы шумят. Легко обнаружить, что в зависимости от того, какого типа микросхема используется, у любого компаратора наблюдается индивидуальная «шумящая область». При медленном приближении дифференциального входного сигнала к области входной характеристики (причем совершенно не важно, с какой стороны осуществляется это приближение) в выходном сигнале может значительно повыситься шумовая составляющая из-за усиления собственных шумов



Рис. 9.4. Осциллограф с точной синхронизацией

или самовозбуждения. При этом уровень таких шумов иногда достигает полного размаха выходного напряжения, вплоть до ограничения на уровне напряжения питания. Этот процесс, возможно, не прекратится даже после того, как входное напряжение выйдет из той области, в которой оно находилось в момент появления самовозбуждения. Следовательно, вполне вероятно, что результаты ваших собственных проверок и измерений напряжения смещения нуля (V_{OS}) не будут совпадать со значениями, измеренными или гарантируемыми изготовителем. И действительно, совсем непросто разработать такой тест, результаты которого *совпали* бы с теми, которые были гарантированы фирмой-изготовителем.

Чтобы измерить V_{OS} компаратора, я обычно использую классическую схему импульсного генератора на операционном усилителе, для которого применяю специально подобранный гистерезис и определенную емкость. В получившемся устройстве возникают колебания вполне конкретной (не очень высокой) частоты. Если вас заинтересовала эта разработка, то в приложении D содержатся принципиальные электрические схемы, которые не являются тривиальными.

Другой способ, позволяющий избежать проблем с компараторами, заключается в использовании интегральных спаренных транзисторов в качестве предварительного дифференциального усилителя в предшествующем компаратору каскаде. Этот предусилитель может повысить усиление и точность с одновременным снижением паразитной обратной связи между выходным и входным каскадами самого компаратора. Примеры довольно медленного прецизионного компаратора читайте в статье [1].

9.6. Диапазон синфазных сигналов

Помимо жалоб на самовозбуждение, большинство претензий к работе компараторов связано с диапазоном синфазных сигналов. В подразделении по прикладному применению разработок фирмы National Semiconductor мы получаем множество запросов от инженеров, которые хотят знать, могут ли они выйти за рамки ограничений, накладываемых на диапазон синфазных сигналов в компараторах. Однако наши ответы их не всегда устраивают. На мой взгляд, подобные нарекания отчасти вызваны тем, что производители не смогли подготовить достаточно понятные технические описания.

Многие специалисты хорошо знают, что диапазон синфазных сигналов операционного усилителя V_{CM} определяется при сигнале одного и того же напряжения на оба входа. Для операционных усилителей данная оговорка имеет смысл, так как при работе большинства из них на оба входа действительно подаются сигналы одинакового уровня. Но чаще всего уровни сигналов, подаваемых на входы компаратора, *различаются*. До тех пор пока оба входных сигнала компаратора будут удерживаться в пределах определенного для компаратора диапазона синфазных сигналов, выходной сигнал компаратора останется правильным.

Однако, если напряжение одного из этих сигналов окажется в пределах этого диапазона, а напряжение другого выйдет за них, возможны три варианта развития дальнейших событий, в зависимости от того, какое напряжение используется и какого типа компаратор. В некоторых пределах входного напряжения можно перегрузить входные каскады и получить вполне нормальную работу компаратора. Если уровень входного сигнала попадает в другой диапазон, то вы можете получить довольно странные результаты, но сам компаратор при этом поврежден не будет. В остальных случаях он моментально выйдет из строя.

Рассмотрим, например, компаратор типа LM339, на который подается однополярное питание напряжением 5 В. Если уровень сигнала на одном из его входов удерживается в диапазоне 0–3,5 В, то на другой вход может подаваться сигнал напряжением от 0 до 36 В. При этом выходной сигнал искажаться не будет и никакое повреждение компаратору не грозит. При комнатной температуре существует вероятность выхода сигнала за границы допустимого диапазона вплоть до –0,1 В, но компаратор будет продолжать выдавать корректный выходной сигнал.

Однако ни в коем случае нельзя допустить уменьшение уровня входного сигнала ниже –0,1 В (скажем, до –0,5 или –0,7). В этом случае, если входной ток компаратора ограничится уровнем, не превышающим 5 или 10 мА, микросхема не будет повреждена или выведена из строя. Но, хотя никакого вреда схеме не наносится, выходные сигналы всех или некоторых компараторов из состава одной микросхемы могут стать ошибочными. Если на изолирующий рп-переход (своего рода паразитный диод, который присутствует и в каждом входном транзисторе микросхемы) подается прямое смещение, то практически по любым внутренним каскадам интегральной микросхемы могут течь токи. Именно эти токи и приводят к появлению искажений выходного сигнала.

В планируемых технических описаниях мы постараемся более подробно рассказывать о параметре V_{CM} . Возможно, тогда мы более четко сформулируем правила

безопасной эксплуатации. Вот как фактически выглядит формулировка, приведенная в технических описаниях на LM612: «Для данного компаратора во всем рабочем диапазоне температур гарантированный диапазон величины синфазных входных сигналов описывается следующим выражением: $V^- \leq V_{\text{см}} \leq (V^+ - 2,0 \text{ В})$. Работать компаратор должен при напряжениях, попадающих в указанный диапазон. Если напряжение на обоих входах соответствует указанному диапазону, то выходной сигнал будет гарантированно находиться в корректном состоянии. Если напряжение только на одном из входов соответствует указанному диапазону, а напряжение на другом входе не превышает $(V^- + 32 \text{ В})$, то несмотря на то, что напряжение на втором входе будет выше, чем V^+ , выходной сигнал также будет находиться в корректном состоянии. Тем не менее, если на одном или на обоих входах напряжение упадет ниже V^- и хотя бы на одном из них входной ток превысит уровень 10 мкА, то корректное состояние выходного сигнала не гарантируется». Это определение номинально применимо и к характеристикам компараторов типов LM339, LM393, а также операционных усилителей типов LM324 и LM358 при использовании последних в качестве компараторов. Таким образом, нельзя сказать, что мы не пытаемся сделать технические описания более точными и понятными, даже если иногда для внесения изменений требуется целых 20 лет.

Итак, если уровень входных сигналов удерживается в допустимых пределах, то заставить компараторы работать правильно не представляет большой сложности. С появлением $\mu\text{A}710$ (первый в мире интегральный компаратор – *прим. ред.*) возросла вероятность повреждения компаратора, так что вам следует привязывать, ограничивать или уменьшать входной сигнал – дифференциальный или любой другой – таким образом, чтобы не вывести микросхему из строя.

9.7. Изменение уровня синфазного сигнала

Еще одной проблемой, о которой обычно ничего не говорится в технических описаниях, является резкое изменение уровня синфазного сигнала. Старый добрый компаратор LM311 относится к числу тех элементов, которые выдают определенные погрешности в случае резких изменений уровня синфазного сигнала. Но этот недостаток присущ практически всем компараторам. Если уровень сигнала на одном из входов внезапно изменится настолько, что пересечет уровень сигнала на другом входе, то возможно, что выходное состояние компаратора изменится с некоторой не совсем точно предсказуемой задержкой. Она вызвана тем, что сигналы во внутренних каскадах компаратора переключаются недостаточно быстро, чтобы его выходы отреагировали на подобное изменение входного сигнала. К примеру, задержка при скачкообразном изменении уровня на 10 В может оказаться на 100 нс больше, чем задержка, вызываемая изменением напряжения на 10 мВ. А если резко изменится уровень обоих входных сигналов, то на выходе могут возникнуть случайные короткие выбросы или ложные импульсы, даже если дифференциальный входной сигнал не изменяет полярности. Будьте внимательней, если в вашей схеме есть вероятность появления подобных сигналов на входах компаратора, а обработка подобных помех не предусмотрена.

Периодически мне поступают жалобы от инженеров-разработчиков приблизительно следующего содержания: «Я несколько лет использовал такие компараторы, и никаких проблем с ними не было. И вдруг они начали работать неправильно. Почему?» Когда мы начинаем разбираться, в чем дело, выясняется, что параметры входных сигналов были очень близки к граничным значениям обычного диапазона синфазных сигналов и значительно выходили за пределы области гарантированно надежной работы.

Можно ли использовать одну интегральную микросхему LM324, если вам нужно три операционных усилителя и один компаратор? Операционные усилители не всегда работают плохо в качестве компараторов, но они, несомненно, медленнее, а LM324 – один из самых медленных. Скорость нарастания выходного напряжения у этого усилителя не просто невысокая – если перегрузить его напряжением, всего на 5 мВ превышающим напряжение V_{OS} , то изменение напряжения выходного сигнала будет происходить со скоростью нарастания выходного напряжения 0,01 В/мкс, а это меньше, чем оговорено в технических условиях. Операционные усилители LF351 или же «четвертинка» микросхемы LF347 справляются несколько быстрее. Так что использовать в качестве компаратора операционный усилитель допускается, только если вам нужен медленный компаратор. (Тем не менее отметим, что если применять микросхему LM358 вместе с микросхемой LM392, то они будут работать как три четверти LM324 с четвертью LM339. А площадь, занимаемая двумя 8-выводными интегральными микросхемами в корпусах мини-DIP, будет всего на 4% больше, чем занимаемая одним 14-выводным корпусом DIP.)

Но, даже учитывая все вышесказанное, некоторые разработчики все-таки используют операционные усилители в качестве медленных, прецизионных компараторов. Несмотря на то что обычно операционные усилители не сертифицированы для использования в качестве компараторов, разрабатывать подобные схемы можно вполне успешно. Если, например, взять микросхему LM709 и включить без корректирующих цепей и конденсаторов, то получится быстродействующий компаратор. Только не перегружайте устройство по входам, иначе оно выйдет из строя.

Иногда меня спрашивают о противоположном: «Могу ли я подключить некоторое количество корректирующих цепочек или конденсаторов к микросхеме LM339 и использовать их в качестве повторителя с единичным коэффициентом усиления?» Вообще-то нет, так как фазовые сдвиги в схеме LM339 будут слишком непредсказуемыми, чтобы ими можно было управлять с помощью той или иной схемы компенсации или коррекции. Тем не менее мне доводилось с помощью рассмотренного метода успешно использовать более медленные микросхемы LP339 и LP365 в качестве медленного инвертора и медленного повторителя.

9.8. Самовозбуждение повторителей

Любая схема, в которой производится усиление тока, может самовозбуждаться, даже если она является простым буфером-повторителем. Согласитесь, что буфер – это в некотором смысле линейный усилитель с очень большим усилением по току. У некоторых буферов коэффициент усиления по напряжению составляет всего 0,90–0,95. У других эти коэффициенты могут доходить до 10 или 20, так

как их выходной сигнал должен иметь размах, например 50 или 100 В или больше. Даже эмиттерные повторители, которые должны работать очень устойчиво, потому что их коэффициент усиления по напряжению меньше 1, могут «подвизгивать» или самовозбуждаться на высоких частотах. Так что независимо от того, используете ли вы буфер промышленного производства или делаете его самостоятельно, не упускайте эту проблему из виду.

Кроме того, может случиться так, что крутизна спада частотной характеристики буфера в области высоких частот будет резко возрастать на 40 или 60 МГц. В таком случае в цепи обратной связи есть вероятность появления фазового сдвига, существенного уже на 6 или 10 МГц. Эта проблема решается, только придется как следует подумать. Буфер также способен вносить в сигнал небольшие искажения, полностью компенсировать которые операционный усилитель на средних и высоких частотах просто не сможет. В технических описаниях про эти искажения обычно ничего не говорится, поэтому надо быть осторожнее. Кроме того, если ток смещения выходного каскада выбран так, чтобы работать в режиме класса АВ, то необходимо обеспечить, чтобы в статическом режиме величина тока покоя выходного каскада была стабильна и не превышала допустимой величины. Ток покоя должен быть не настолько малым, чтобы возникали искажения, и не настолько большим, чтобы потребление энергии стало чрезмерным.

Один из стандартных методов, которыми я пользуюсь для корректирования схемы повторителя с единичным усилением, заключается в установке конденсатора в местной петле обратной связи, охватывающей определенную часть схемы (рис. 9.5). Эта схема может работать на емкостные нагрузки, так как буфер «развязывает» нагрузку, в то время как местная обратная связь, подключенная к операционному усилителю, обеспечивает устойчивость. Большинство повторителей с единичным усилением – полупроводниковых, гибридных или дискретных – неустойчивы при работе от источников с индуктивной составляющей выходного сопротивления, поэтому длина входных выводов должна быть минимальной. Устойчивость можно повысить с помощью последовательно включенного резистора, но это ухудшит частотные характеристики системы.

Множество высокоскоростных буферов применяется для работы на нагрузки от 50 до 150 Ом. С этой целью, вероятно, понадобится большой выходной ток, который может привести к перегреву. Необходимо тщательно продумывать систему теплоотвода и конструкцию радиаторов для того, чтобы устройство не могло нагреться до температур, превышающих максимально допустимые.

Во многих буферах не предусмотрено никаких средств автоматического отключения или ограничения при перегреве, но пример новых операционных усилителей типа LM6321 и LM6325 показывает, что в высококачественный операционный усилитель такие средства вполне могут быть встроены. Чтобы предотвратить отражение сигнала и возникновение «звона» при использовании буферов для возбуждения удаленных нагрузок, следует убедиться, что оба конца линии передачи или кабеля, по которым подается сигнал, работают с соответствующими согласованными сопротивлениями. Если допустимо уменьшение уровня сигнала, то лучше всего включить между выходом буфера и кабелем резистор сопротивлением 50 Ом.

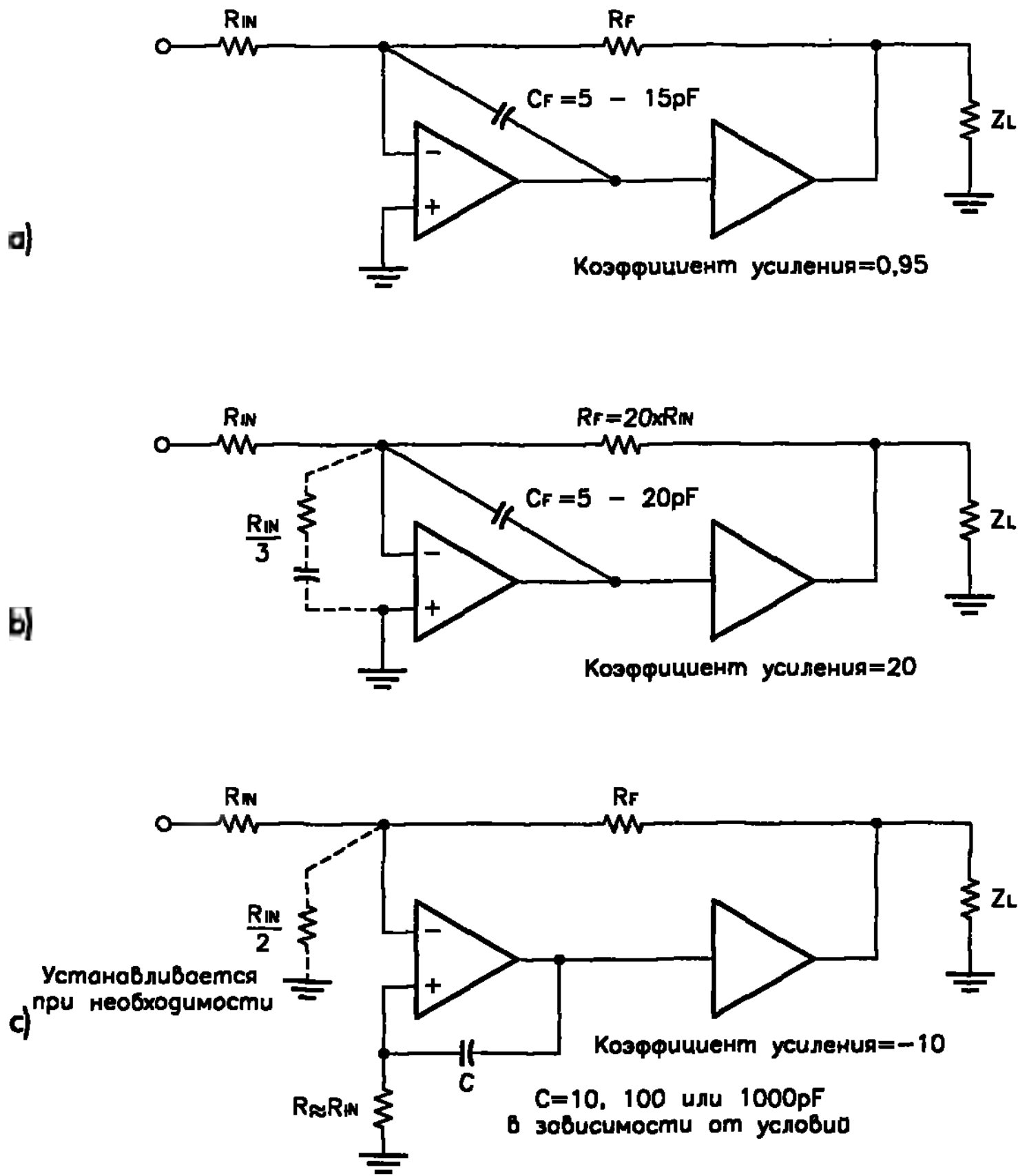


Рис. 9.5. Коррекция сильноточных схем

В зависимости от коэффициента усиления буфера для стабилизации буферного усилителя используется одна из указанных схем.

Если же используемый вами буфер имеет еще и большой коэффициент усиления по напряжению, то вам необходимо убедиться в том, что его схемотехника обеспечивает нужную крутизну спада усиления на высоких частотах, иначе схема будет работать неустойчиво. В случае, когда буферный усилитель обеспечивает положительное усиление, подобно устройству, схема которого приведена на рис. 9.5b, вы можете использовать местную емкостную обратную связь в основном операционном усилителе. Однако, если коэффициент усиления буферного усилителя равен -10 (рис. 9.5c), вы можете попробовать применить местную обратную связь с входа буферного усилителя (с выхода операционного усилителя) на неинвертирующий вход основного операционного усилителя. Иногда устойчивости можно добиться, установив корректирующую RC-цепочку между неинвертирующим входом операционного усилителя и землей, увеличив тем самым коэффициент усиления по шумам. Но этот прием не всегда срабатывает. Корректирование

подобной схемы с обратной связью представляет собой непростую задачу, так как в ней содержится несколько каскадов с очень большим усилением. Но включение конденсатора местной обратной связи по инвертирующему входу решает эту задачу просто и надежно.

9.9. Защелкивание

Случайное защелкивание какой-нибудь схемы представляет собой проблему, противоположную самовозбуждению. Разумеется, вы очень хорошо представляете, что защелкнувшаяся схема – это генератор с нулевой частотой.

Несмотря на то что защелкивание схемы является неисправностью, которую требуется отыскать, у нее есть одна положительная черта – состояние схемы неизменно и она легко доступна для вас. Можно промерить с помощью вольтметра все каскады этой схемы и выяснить, в каком они были состоянии, когда защелкнулись. Это вовсе не означает, что искать неисправности в подобных случаях очень просто, так как часто никто не может сказать, почему все так произошло, а в структурах и слоях интегральных схем могут быть потоки носителей, «дотронуться руками» до которых просто невозможно.

Самое неприятное заключается в том, что иногда защелкивание бывает губительным для схемы, и оставить все как есть просто нельзя. Разобраться со схемой, защелкнувшейся в «опасном для ее жизни» состоянии, можно двумя способами:

- быстро выключить питание, чтобы защелкнувшаяся схема ничего не повредила. Включать питание на небольшие промежутки времени, наблюдая за состоянием схемы по мере того, как она разрушается (см. главу 2);
- подключить схему к регулируемому источнику питания с нулевой или небольшой выходной емкостью, в котором предусмотрено ограничение тока (пример принципиальной схемы такого источника приведен в главе 2). Тогда в момент защелкивания отказ приведет к быстрому понижению напряжения источника питания.

Кроме того, вы сами можете непреднамеренно вызвать защелкивание схемы, нарушая последовательность включения напряжений от нескольких источников питания. Работа некоторых усилителей и схем полностью нарушается, если одно из напряжений питания (обычно положительное) подключается первым. Этой проблемы помогает избежать устройство автоматического контроля за последовательностью подключения питающих напряжений, а также последовательное включение в каждую из шин питания выпрямительного диода для защиты от противотоков. Отметим, что установка таких диодов – также отличный способ предупреждения повреждений, вызываемых подачей питания в обратной полярности или короткими замыканиями в цепях питания.

Обычно раз в несколько месяцев кто-нибудь обращается ко мне с вопросом об отгрузке клиентам (или запуске в производство) устройств, содержащих микросхемы типа LM108, на выводы которых могут подаваться напряжения противоположной полярности (то есть на выводы, предназначенные для подачи -15 В , может быть подано $+15\text{ В}$, и наоборот). Мне всегда очень неприятно отвечать, что

такие устройства надо выбрасывать, а в следующий раз обязательно включать в каждую шину питания диоды защиты от противотоков или переполюсовки. В частности, защитные диоды следует устанавливать на все шины питания вашей системы для того, чтобы защитить нагрузки и схемы. А чтобы защитить источники питания, защитные диоды надо установить встречно-параллельно их выходам (рис. 9.6). Некоторые специалисты считают, что чем меньше в схеме элементов, тем выше ее надежность, но, на мой взгляд, нужная деталь в нужном месте повышает надежность всей схемы в гораздо большей степени. Комментарии по этому вопросу можно прочитать в главе 13.

Характеристики пассивных элементов, хотя и очень редко, могут оказаться в достаточной степени температурно-зависимыми и быть причиной всех проблем. Так что не забывайте и о них. Даже если характеристики схемы при нагреве не улучшаются, они могут ухудшиться при охлаждении, вот почему убедитесь в работоспособности схемы, поместив ее в морозильную камеру.

Я считаю, что устранить самовозбуждение недостаточно. Вы должны подать на схему мощный входной сигнал и проверить, как схема будет себя вести: перейдет в состояние, близкое к самовозбуждению, или останется вполне устойчивой. Это относится не только к стабилизаторам, но и ко всем другим устройствам, для которых актуальна проблема борьбы с самовозбуждением.

Например, если подключение резистора сопротивлением 47 Ом к базе транзистора избавляет схему от самовозбуждения, но при этом не помогают резисторы ни сопротивлением 24 Ом, ни 33 Ом, ни 37 Ом, то это означает, что 47 Ом – значение, гораздо более близкое к пограничному, чем могло показаться. Возможно, лучше воспользоваться резистором с номиналом 75 Ом, правда, при условии, что резисторы сопротивлением 100, 120 или 150 Ом также устраняют самовозбуждение.

Иначе говоря, порой даже простые домыслы и везение могут оказать помощь в подавлении самовозбуждения. Но, не применив при этом ряда специальных методов, вы не сможете быть уверены, что избавились от него. Более того, больших успехов могут добиться лишь те, кто учится на опыте других людей.

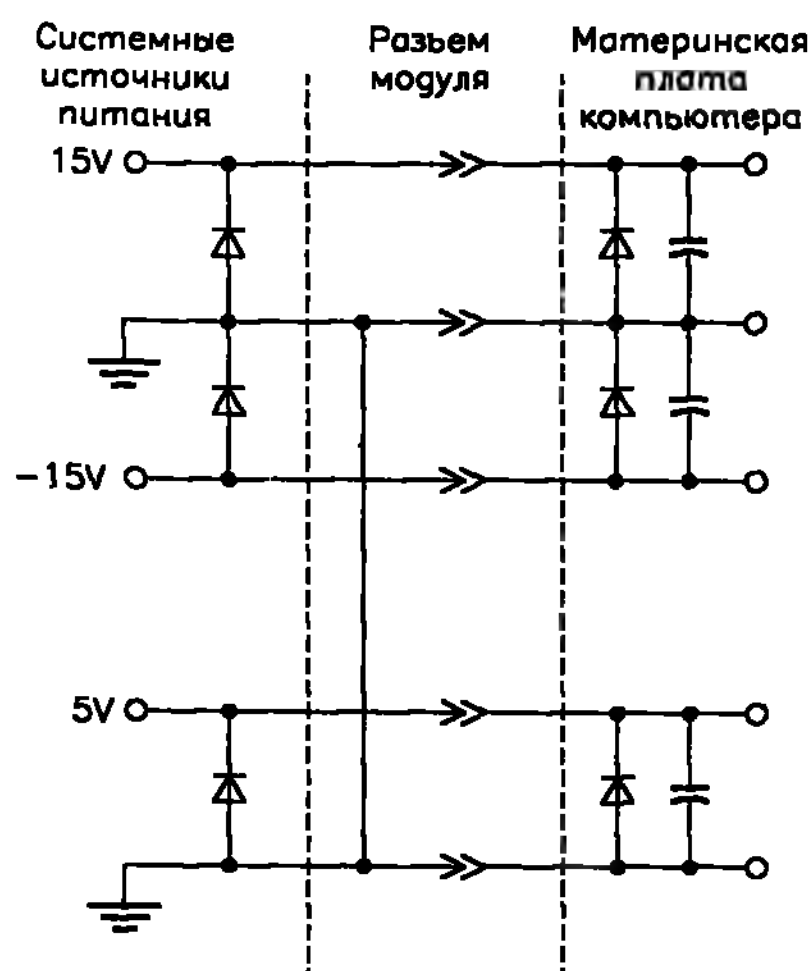


Рис. 9.6. Надежные межплатные соединения

Установка диодов защиты от переполюсовки в цепях подачи питания и одновременно на каждой печатной плате значительно снижает вероятность повреждения источников питания или самих устройств, вызываемых случайными короткими замыканиями или подключением питания в обратной полярности.

Я вовсе не думаю, что техники, не имеющие высшего образования, не могут заниматься устранением неисправностей только потому, что не знакомы с теоретическими обоснованиями и условиями возникновения генерации в схемах. Просто неопытный или невнимательный сотрудник, независимо от того, является ли он техником или дипломированным инженером, может не заметить, что режимы работы схемы находятся в опасной близости к границам, при которых еще возможна устойчивая работа. Например, известен такой случай, когда лучшие инженеры не могли даже предположить, в чем заключается проблема, а старый необразованный техник спас проект, обратив общее внимание на незначительную деталь, которая была причиной неполадки.

Литература

Linear Brief LB-32, Microvolt Comparator, in *NSC Linear Applications Book*, 1980–1990.

10. АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ

В предыдущих главах разговор шел о радиоэлементах и схемах, которые обычно рассматриваются как аналоговые. Теперь мы поговорим о том, что смущает и пугает очень многих инженеров, – о границе между аналоговым и цифровым мирами. Вооружившись имеющимися у вас солидными теоретическими познаниями и представленными на страницах этой книги советами, вы сможете погрузиться в мир, где аналоговое соединяется с цифровым, и это путешествие не покажется вам выходом за границы реального.

Существует множество классов схем, которые нельзя однозначно отнести ни к аналоговым, ни к цифровым. Будучи специалистом по аналоговым схемам, я, конечно, не испытываю больших проблем, так как рассматриваю абсолютно все схемы как аналоговые. И действительно, если в схеме, содержащей как аналоговые, так и цифровые радиокомпоненты, возникают неполадки, то для поиска решения проблемы вам скорее понадобится опыт работы с аналоговыми схемами, чем знания в области цифровой схемотехники. Таймеры, различные ЦА и АЦ преобразователи, преобразователи напряжение-частота и частота-напряжение, а также устройства выборки/хранения находятся точно на «линии границы» между аналоговым и цифровым мирами. Для того чтобы цифровая схема заработала, необходимо учесть большое количество чисто «аналоговых» тонкостей. И даже мультиплексоры, которые вы, наверное, всегда относили к аналоговым устройствам, обладают рядом особенностей, являющихся следствием их тесной связи с цифровым миром.

10.1. Таймеры

Таймер, по своей сути, представляет сочетание компаратора и логической схемы, которая обычно строится на основе принципов, применяемых в аналоговой схемотехнике. Очень известный таймер типа 555 обладает множеством полезных свойств, но при этом с ним, несомненно, связано и большое количество неприятностей. Я собираюсь рассказать о самых характерных проблемах, возникающих при его применении.

Во-первых, многие делают попытки собирать таймеры на самых убогих, наиболее подверженных утечкам – обычно электролитических – конденсаторах. Потом начинают выражать недовольство, так как получившиеся таймеры оказываются неточными или же генерируемые ими сигналы – не периодическими. Кое-кто настойчиво создает таймеры, которые в течение нескольких десятков секунд работают непрерывно, после чего возникают проблемы с настройкой схемы, чтобы время отмечалось исключительно точно. Я объясняю людям, что, конечно, можно построить и двухминутный таймер, воспользовавшись микросхемой LM322, но это будет *большой ошибкой*. Лучше было бы сделать простой генератор с частотой 4 Гц, используя четверть микросхемы LM324 или LM339 и недорогие малогабаритные компоненты. Этот генератор будет выдавать тактовые импульсы на цифровые счетчики CD4020 или CD4040. Последний выход такого счетчика, Q12 и Q14 соответственно, позволит сформировать нужные временные интервалы с большей точностью.

Подобная конструкция стоит дешевле, места занимает меньше и обладает более высокой точностью по сравнению с той, которую вы могли бы получить, потратив уйму денег на полиэтилентерефталатный конденсатор емкостью 47 мкФ для таймера с большим временем выдержки или же смирившись с утечками танталового конденсатора, гарантии на величину которого ни один производитель не даст. Кроме того, среднечастотный импульсный генератор можно настроить всего за несколько секунд, используя выходы младших разрядов делителя частоты, а на настройку таймера, рассчитанного на большой интервал времени, могут потребоваться часы. Счетчики КМОП достаточно дешевы, и в настоящее время мне удается убедить клиентов не покупать аналоговые микросхемы для устройств выдержки промежутков времени от 2 до 20 минут. В технических описаниях на LM555 содержится совет избегать применения во времязадающих цепях резисторов сопротивлением более 20 МОм. Правда, вы можете раздобыть КМОП модификацию таймера (LMC555 или эквивалентные устройства) либо воспользоваться КМОП компаратором или операционным усилителем, которые смогут работать с сопротивлением 100 МОм или больше. Только нужно следить за утечками по плате или в панельках, как это всегда делается с обычной высокоомной схемой на операционных усилителях, тогда вы сможете использовать конденсатор более высокого качества и меньших габаритов.

Более того, совсем не очевидно, что все таймеры типа 555 работают одинаково. Микросхемы этого типа, выпускаемые разными изготовителями, обладают различной внутренней структурой и различными схемами последовательности выполнения логических операций. Так что обязательно проверьте, как обстоят дела на самом деле: 555-е таймеры разных изготовителей могут отличаться друг от друга.

При работе на высоких частотах время выдержки таймера приблизительно равно $0,693 R \times C$ и определяется таким образом: $0,693 R \times (C + C_{\text{монтажа}}) + T_{\text{задержки}}$. В большинстве книг (и технических описаний) об этом ни разу не упоминается. Итак, для того чтобы быстродействующая схема на таймере *работала как нужно*, вам следует быть особенно внимательными. Подобные разработки не всегда являются простыми, и, воспользовавшись материалами, приведенными в [1], вы, вероятно, сможете избежать хотя бы части проблем. Ведь таймер, в конце концов, – это

всего лишь набор радиоэлементов, среди которых находится компаратор, так что многие из тех методов, которые вы используете при работе с компараторами, применимы для таймеров, и наоборот.

10.2. Цифровые интегральные микросхемы

Несмотря на то что таймеры отчасти являются цифровыми устройствами, классические цифровые интегральные схемы выполняют исключительно логические функции. И тем не менее в руках сообразительного разработчика некоторые цифровые интегральные схемы могут оказаться очень полезными для выполнения различных аналоговых функций. Например, счетверенные аналоговые ключи из микросхемы CD4066 можно использовать в качестве отличных переключателей с небольшим уровнем утечек. А из микросхемы 74C74 получается замечательный фазовый детектор для систем фазовой автоподстройки частоты [2]. В нем устраивает не только цена, но и потребляемая мощность. Даже если обычная интегральная схема на основе КМОП технологии окажется недостаточно быстродействующей, вы сможете увеличить скорость, используя вместо нее высокоскоростные КМОП серии или аналоги из серий 74ALS или 74AS. Я не собираюсь подробно на этом останавливаться, лучше непосредственно перейду к перечислению длинного списка *неприятностей* и *проблем*, с которыми вы можете столкнуться при работе с цифровыми интегральными схемами (при этом неважно, что именно вы разрабатываете, аналоговое устройство или цифровое).

Прежде всего вам необходимо установить, из расчета по одному на каждую цифровую схему, развязывающие керамические конденсаторы с емкостью от 0,02 до 0,2 мкФ или, в случае когда это настоятельно рекомендуют производители интегральной микросхемы, даже 1 мкФ. Дополнительно к этому нужно установить танталовый конденсатор емкостью 2–10 мкФ на каждые две, три и четыре цифровые интегральные микросхемы. Керамические конденсаторы обеспечат надежную развязку и локальную фильтрацию высокочастотных шумов, а танталовые – сгладят «звон» на шине питания. Если вы не можете использовать танталовый конденсатор, попробуйте алюминиевый электролитический емкостью от 10 до 20 мкФ. Если же и это вам не подходит, то для того, чтобы обеспечить требуемый уровень подавления, можете *вместо* вышеупомянутых конденсаторов подключить полиэтилентерефталатный (майларовый) конденсатор емкостью от 1 до 2 мкФ, изготовленный по технологии с «выпуском» фольги, включив последовательно с ним угольный или иной резистор сопротивлением 1 Ом. В том случае, когда для работы вашей аналоговой схемы действительно необходимы чистые, четкие цифровые сигналы (выходы КМОП микросхем представляют собой идеальные генераторы прямоугольных импульсов до тех пор, пока в цепи питания не появятся «звон» и «дребезг»), то вам, возможно, понадобится еще более глубокая фильтрация – вплоть до сотен микрофард.

10.3. «Плавающий» вход

В ТТЛ микросхемах неиспользуемые входы можно оставлять свободными или плавающими. При этом на них обычно присутствует высокий логический уровень.

В КМОП микросхемах все неиспользуемые входы (например, входы установки в единицу или установки в ноль триггера) обязательно должны быть подключены к положительному полюсу питания или к земле, в зависимости от того, что требуется. В противном случае сигнал на этих входах будет «плавать», что приведет к появлению странных и запутанных проблем. Кроме того, если входы оставлены плавающими, скажем, на неиспользуемых логических элементах, то они могут вызвать значительное и совершенно нежелательное потребление энергии и привести к саморазогреву.

При работе с КМОП микросхемами люди обычно говорят, что можно использовать инвертор в качестве усилителя, включив резистор сопротивлением в несколько мегаом между входом и выходом. При низких напряжениях с помощью подобного метода можно сделать средненький усилитель, но если напряжение питания выше 6 В, потребление энергии становится очень большим, а усиление – очень низким. Я не советую использовать подобный подход при разработке современных схем.

Много лет назад была очень популярна логическая схема типа монтажное ИЛИ, когда выходы нескольких ДТЛ или ТТЛ логики с открытым коллектором соединялись вместе. Этот метод сейчас использовать не рекомендуется, потому что такое включение предположительно ведет к проблемам при поиске неисправностей. Я не знаю, какие еще имеются причины, чтобы не применять эту схему, за исключением того, что при ее использовании приходится выполнять напрасную работу. Правда, выход с открытым коллектором, с резистивной нагрузкой в цепи положительного напряжения питания работает медленнее, чем обычный логический элемент, и потребляет больше энергии.

Кое-кто из инженеров ворчал на меня, что если оставить входы ТТЛ и ДТЛ логики плавающими, то некоторое время они, возможно, проработают. Однако, только если все сигнальные линии будут собраны в жгуты или шины, на неиспользуемые выводы может быть наведен сигнал, что, вероятно, приведет к ложным и непредсказуемым срабатываниям устройства. Так что совсем нехорошо оставлять ТТЛ входы плавающими. Также не совсем правильно подключать их к шине +5 В непосредственно, а не через резистор сопротивлением 1 кОм. Тогда кратковременный бросок напряжения до уровня +7 В на шине питания нанесет меньше вреда.

Если инженерам-создателям цифровых систем требуется работать на шину большой длины, скажем дюймов на 20–30, они трассируют ее особым образом – так, чтобы шина вела себя подобно полосковой линии с волновым сопротивлением 75 или 93 Ом. Кроме того, на один или даже на оба конца шины они устанавливают согласующие резисторы для того, чтобы обеспечить демпфирование и устранить отражения сигналов и «звон». Когда вам приходится прокладывать длинные линии в аналоговых схемах, вы вынуждены делать то же самое. Обратите внимание, что для передачи действительно коротких импульсных сигналов разработчики цифровых систем даже не прокладывают дорожки на печатных платах под прямыми углами. Поворот такой дорожки выполняется в виде двух изгибов под углом 45°. Многие инженеры, имеющие дело с цифровой техникой, долго учились тому, как работать с реальными сигналами в реальном мире, и отлично разбираются в некоторых аналоговых технологиях.

10.4. Сигналы

Несмотря на то что многие инженеры-цифровики отлично разбираются в проблемах реальной схемотехники, они часто изображают форму генерируемых логическими элементами и триггерами сигналов слишком схематично в виде четких идеального вида меандров с вертикальными фронтами. При этом на подобных диаграммах выходной сигнал изменяется одновременно с входным. Однако опытные инженеры знают, когда дело доходит до конкретных мелких деталей, надо готовиться к тому, что у всех сигналов окажутся конечные времена нарастания и спада и появятся задержки распространения. Учет этих мелких деталей играет огромную роль при разработке быстродействующих устройств.

Например, если напряжение на информационном входе D-триггера нарастает как раз *перед тем*, как на тактовом входе появляется импульс синхронизации, то выходной сигнал будет таким, каким и должен быть. Если же напряжение на информационном входе нарастает *сразу после* появления синхронизирующего сигнала, то логический уровень выходного сигнала будет низким. Однако если изменение состояния на информационном входе D-триггера *точно* совпадет с самым неудачным моментом времени, то выходной сигнал может стать «метастабильным», на некоторое время «зависнуть» посередине между ВЫСОКИМ и НИЗКИМ логическими уровнями и такое неопределенное состояние будет длиться в течение нескольких десятков наносекунд, пока окончательно не установится одно из значений. Или же, если изменение сигнала происходит чуть раньше или чуть позже, то на выходе может появиться необычно узкий импульс, называемый в Америке «коротышка» (gunt pulse), а в России и СНГ – «иголлка».

Если «иголлка» передается на тактовый вход другого триггера или счетчика, то есть вероятность ошибочного срабатывания счетчика, и того, что он перейдет в новое, может быть, даже неверное состояние. Таким образом, вам следует предупредить возникновение «иголок» и убедиться в том, что правильная периодичность сигналов синхронизации на триггерах или счетчиках не нарушена. На рис. 10.1а показана схема устройства с D-триггером, которая является иллюстрацией данной проблемы. Если состояние компаратора меняется случайным образом, то это изменение может внезапно совпасть с неудачным моментом времени – то есть с нарастающим фронтом сигнала синхронизации, в результате чего выходной импульс будет уже или шире, чем нормальный. В некоторых типах аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) такой эффект способен вызвать нарушение линейности либо искажение результатов преобразования. Удачным решением этой проблемы является применение задержанных сигналов синхронизации, управляющих записью данных во второй триггер, как показано на рис. 10.1б.

Процесс образования «иголок» известен и под другим названием – «гонки» (glitch). Классический пример появления «гонок» наблюдается во время работы счетчика со сквозным переносом, например типа 7493, к выходам которого подключен преобразователь кода или дешифратор, скажем, типа 7442. В тот момент, когда состояние счетчика изменяется от 0111 в 1000, в течение нескольких наносекунд на выходах счетчика будет отмечен код 0000 и не исключено, что на соответствующем выходе дешифратора появится короткий импульс длительностью приблизительно 6–8 нс, который будет соответствовать коду 0000 на входе.

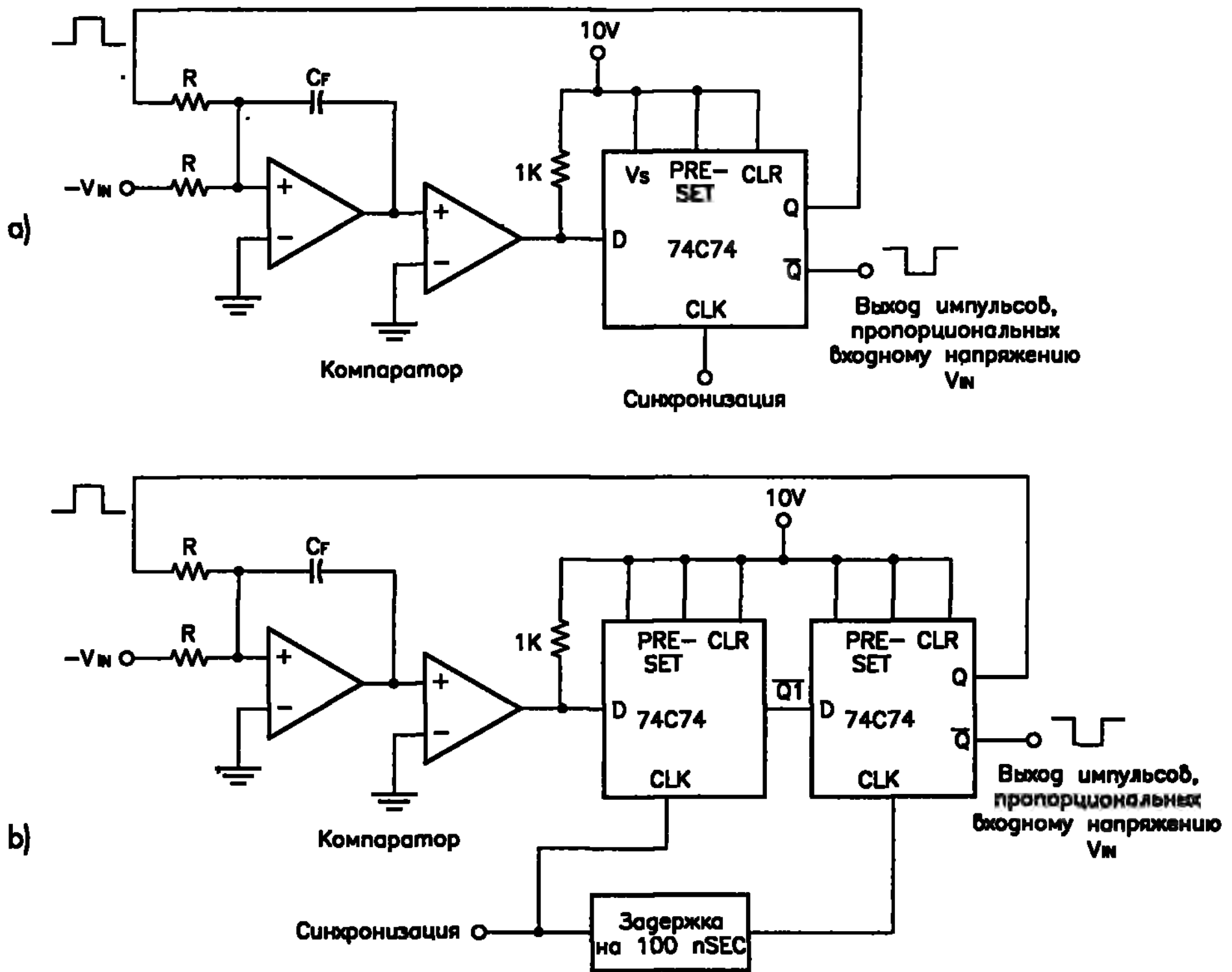


Рис. 10.1. Время-импульсный АЦП

Проблемы в этом АЦП (а) вызваны «иголками». Состояние компаратора изменяется случайным образом, асинхронно. Иногда изменение состояния на выходе происходит в совершенно неподходящий момент времени, то есть совпадает с нарастающим фронтом сигнала синхронизации, и это приводит к тому, что выходной импульс становится уже или шире, чем необходимо. Проблему можно решить, используя два триггера, у которых сигналы синхронизации задержаны один относительно другого.

Даже в том случае, если вы проводите наблюдения с помощью высококачественного осциллографа, длительность этого импульса может оказаться слишком короткой для того, чтобы он не был пропущен. В случае подключения дешифратора только к светодиодному индикатору вы никогда не заметите субмикросекундный световой импульс. Однако если выходные сигналы с дешифратора передаются на цифровой счетчик, результаты счета могут быть ошибочными. Для выявления «иголок» и «гонок» в цифровых системах и поиска вызывающих их причин инженеры часто используют анализаторы логических состояний, запоминающие осциллографы, а также осциллографы с расширенной полосой рабочих частот. При работе в области аналоговых систем у вас, вероятнее всего, не окажется анализатора логических состояний, однако сверхкороткие импульсы все же будут беспокоить. Нужно это учитывать и заранее быть готовыми к их выявлению.

Есть еще кое-что, о чем вы должны знать в отношении цифровых интегральных схем: расположение выводов у многих КМОП микросхем совпадает с расположением

выводов у ТТЛ логики. Например, у микросхем 74193, 74LS193 и 74C193 выводы расположены одинаково. Но необходимо отметить, что у некоторых устаревших типов КМОП элементов и других ТТЛ микросхем с похожими наименованиями расположение выводов не совпадает. У 74C86 расположение выводов совпадает с цоколевкой 74L86, но совершенно отличается от 7486. Будьте внимательны! Я подготовил перечень всех интегральных схем с нестандартным расположением выводов (см. приложение А).

Также многие, хотя и не все, параметры некоторых КМОП микросхем совпадают с такими же параметрами их ТТЛ аналогов. Например, триггер 74C74 по расположению выводов и на 95% по функциональным характеристикам совпадает с ТТЛ аналогом типа 7474. У обеих микросхем практически идентичны таблицы истинности, за исключением одного: если на входы предустановки и сброса одновременно подается логический ноль, то на обоих выходах ТТЛ элемента (Q и $\bar{Q}$) также одновременно появляется низкий логический уровень, а у КМОП микросхем оба выхода переходят в ВЫСОКИЙ логический уровень. Если у кого-нибудь из вас есть полный перечень подобных отличий, то я бы с большим удовольствием получил его копию.

Сейчас выпускаются буферизованные (CD4001BN) и небуферизованные элементы (CD4001), небуферизованные (MM74HCU04) и буферизованные инверторы (MM74HC04). Иногда при покупке деталей с одинаковым наименованием компонента у двух разных изготовителей может оказаться, что в одном случае логика будет небуферизованная, а в другом – буферизованная. Небуферизованные элементы, безусловно, быстрее работают при небольших нагрузках, зато буферизованные лучше справляются с большими. Таким образом, если вы работаете с прецизионным устройством, учтите, что замена радиоэлементов схемы на элементы с аналогичным наименованием, но других производителей может нарушить работу всей системы. Будьте внимательны при передаче сигналов из аналоговых устройств в цифровые. Например, операционный усилитель LM324, работающий с однополярным питанием напряжением 5 В, обладает недостаточным запасом устойчивости для того, чтобы работать непосредственно на входы КМОП микросхем. Зато для того, чтобы предотвратить появление перегрузки по входам логического устройства от операционного усилителя, работающего с питанием ± 5 или ± 10 В, потребуется предусмотреть некоторые средства для ограничения сигнала или использовать резистивный делитель (рис. 10.2).

Более того, считается, что вредно перегружать входы цифровых интегральных схем, надеясь только на то, что они защищены встроенными ограничительными диодами. Например, вы можете построить генератор импульсов (его схема изображена на рис. 10.3), но практика подачи на входы КМОП микросхем сигналов от источника напряжения, уровень которого равен или превышает напряжение питания, считается нежелательной. И это может быть применено в том случае, когда емкость конденсатора превысит 0,01 мкФ или напряжение питания окажется больше 6 В. На рис. 10.4 показаны схемы, с помощью которых можно решить данную задачу, не перегружая входы КМОП микросхем.

Один из читателей предупредил меня, что некоторые ТТЛШ микросхемы с малым потреблением, например DM74LS86 и 74LS75, весьма чувствительны даже

к очень кратковременным уменьшениям напряжения на их входах ниже уровня земли и после этого в течение длительного времени работают неправильно. Мне кажется, что в данном случае мы, вероятно, имеем дело с токами, начинающими течь непосредственно через карманы на кристалле, как в случае с компаратором LM339. Таким образом, работа этих элементов полностью нарушается при подаче на их входы сигнала с напряжением, меньшим уровня земли. Прочтите в связи с этим письмо господина Дж. Кунца (J. Koontz), приведенное в главе 13.

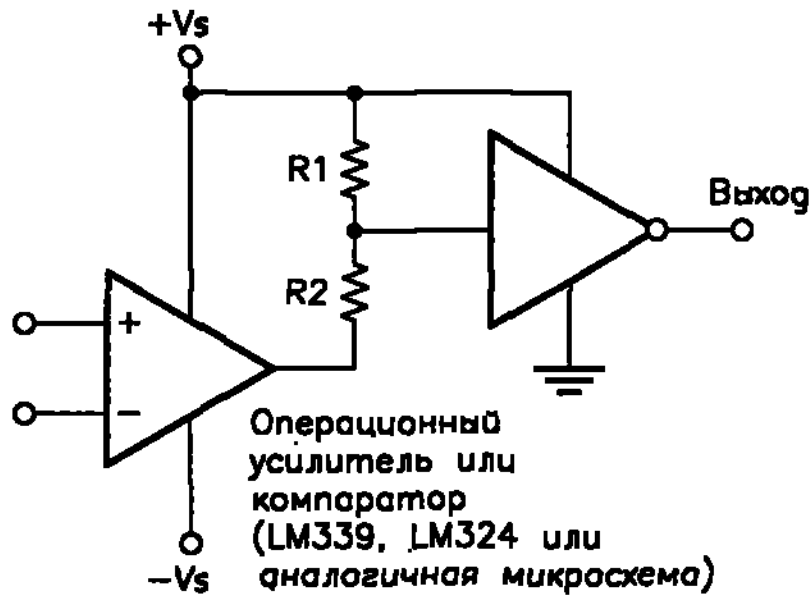


Рис. 10.2. Согласование уровней

При возбуждении логических схем с помощью сигналов, получаемых от операционных усилителей, на которые подается обычное питание большим напряжением, между усилителем и логической микросхемой требуется устанавливать резистивный делитель. Здесь приведены уравнения, с помощью которых можно вычислить номиналы элементов делителя.

Примечание к рис. Для КМОП микросхем $R1/R2 \cong +Vs / |-Vs|$, например: при $+Vs = 5V$ и $-Vs = -5V$ получим $R1 \approx R2 = 10 \text{ кОм}$; для ТТЛ микросхем

$\frac{|-Vs|}{R2} = \frac{+Vs}{R1} + 1,6 \text{ мА}$, например: при $+Vs = 5V$ и $-Vs = -5V$ получим $R1 = 4,7 \text{ кОм}$ и $R2 = 2,2 \text{ кОм}$; для ТТЛШ микросхем

$\frac{|-Vs|}{R2} = \frac{+Vs}{R1} + 0,16 \text{ мА}$, например: при $+Vs = 5V$ и $-Vs = -5V$ получим $R1 = 4,7 \text{ кОм}$ и $R2 = 3 \text{ кОм}$.

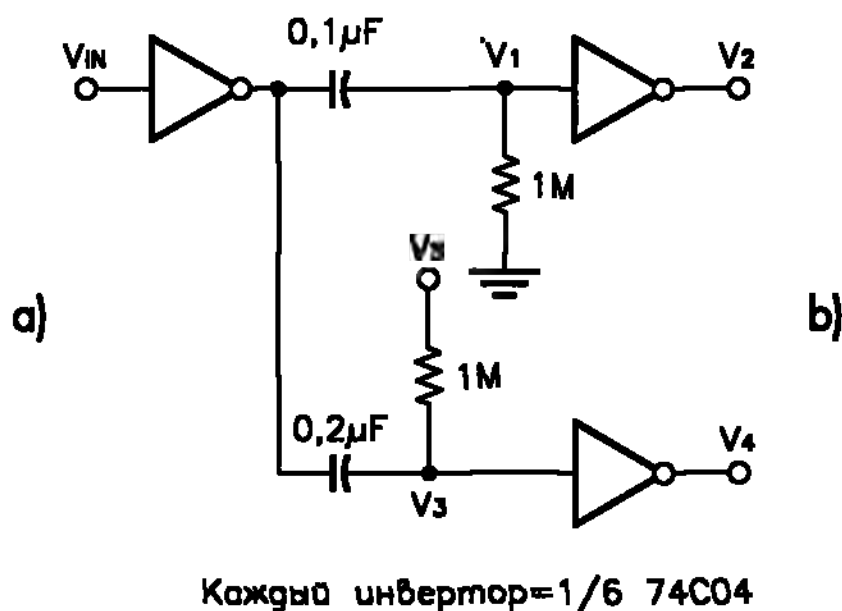
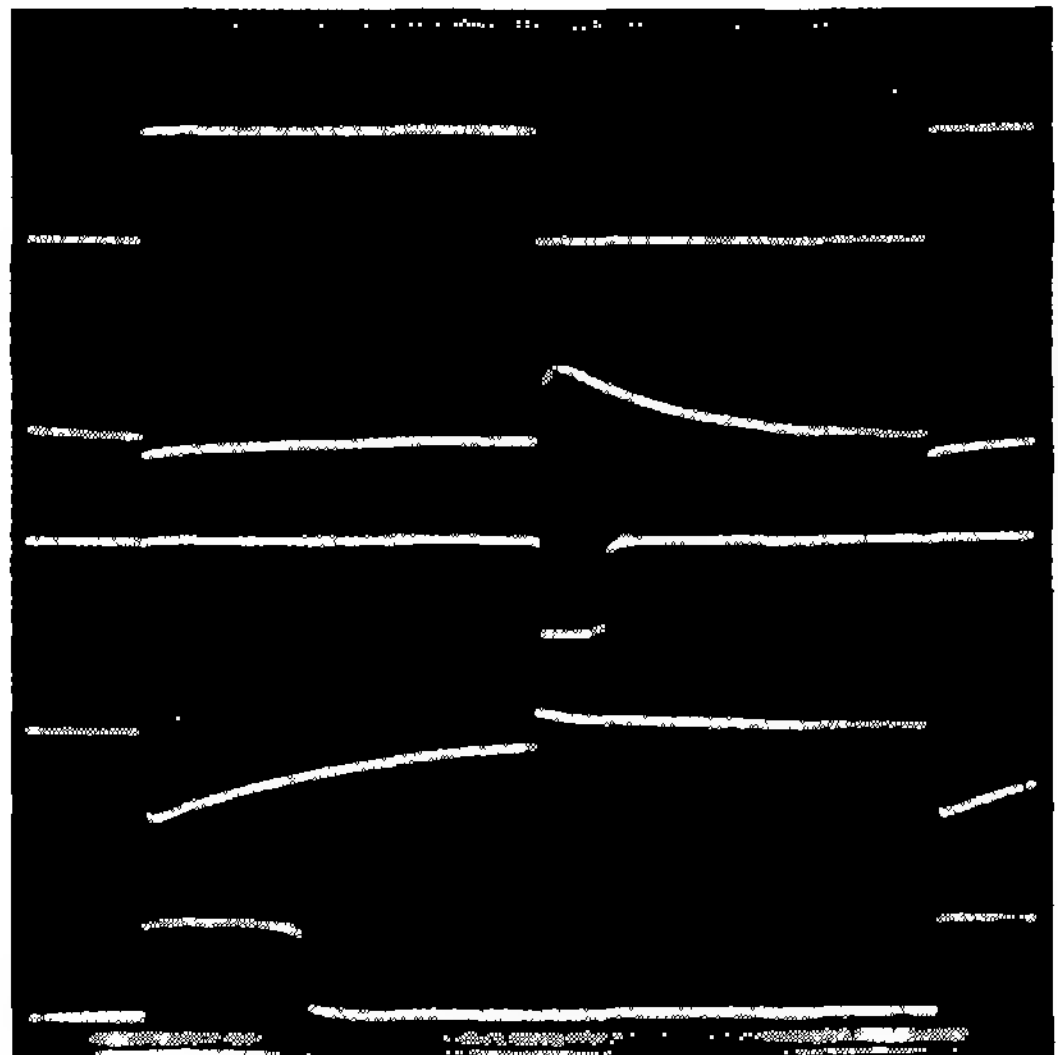


Рис. 10.3. Перегрузки на входах

При построении генераторов и формирователей импульсов на КМОП микросхемах не рекомендуется использовать схему (a), так как собранный по такой схеме генератор при указанных на ней номиналах деталей будет чрезмерно перегружать входы логического элемента, что и показывают осциллограммы на схеме (b).



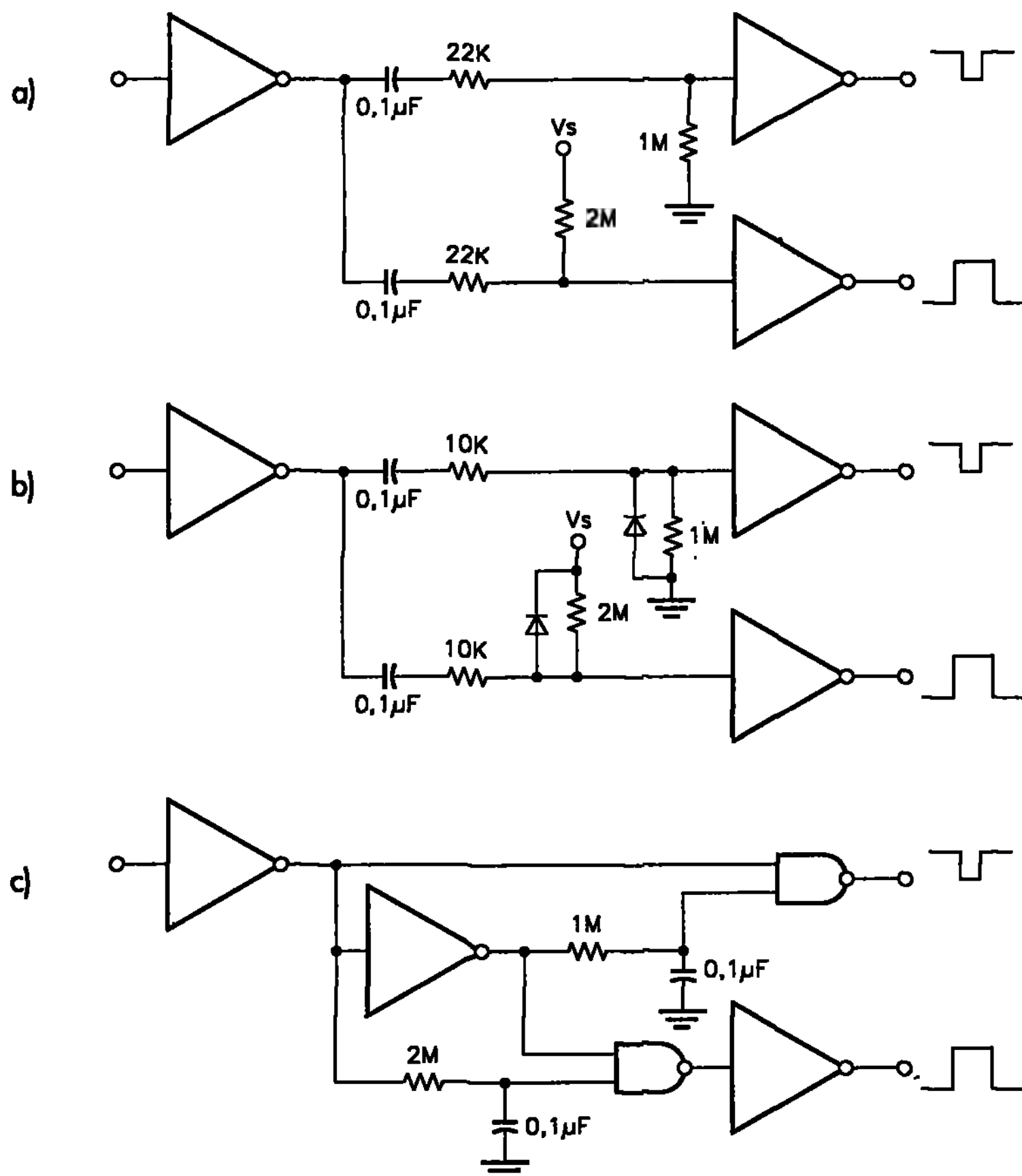


Рис. 10.4. Надежные формирователи

Установка в схеме 10.3а дополнительных резисторов помогает снизить перегрузку, однако еще больший эффект дает установка параллельно времязадающим резисторам защитных диодов. Если у вас есть возможность использовать два двухвходовых элемента И-НЕ, то лучше всего построить формирователь так, как показано на схеме (с).

Примечание к рис. Все вентили – КМОП.

10.5. Наводящие вопросы

Несколько лет назад я наблюдал за отрицательным фронтом на выходе обычного ТТЛ элемента. Меня особенно интересовало то, как именно на этом фронте происходил выброс до $-0,4$ В. Я изготовил специальный аттенюатор с подключенным параллельно резистору верхнего плеча конденсатором емкостью 1 пФ (см. рис. 10.5) и к своему удивлению обнаружил, что при считывании параметров сигнала с помощью обыкновенного щупа (с входной емкостью 11 пФ) появлялся выброс. Если же я отсоединял щуп от выхода элемента и подключал его к выходу аттенюатора, то выброс пропадал. Значит, даже если вы используете щуп с достаточно

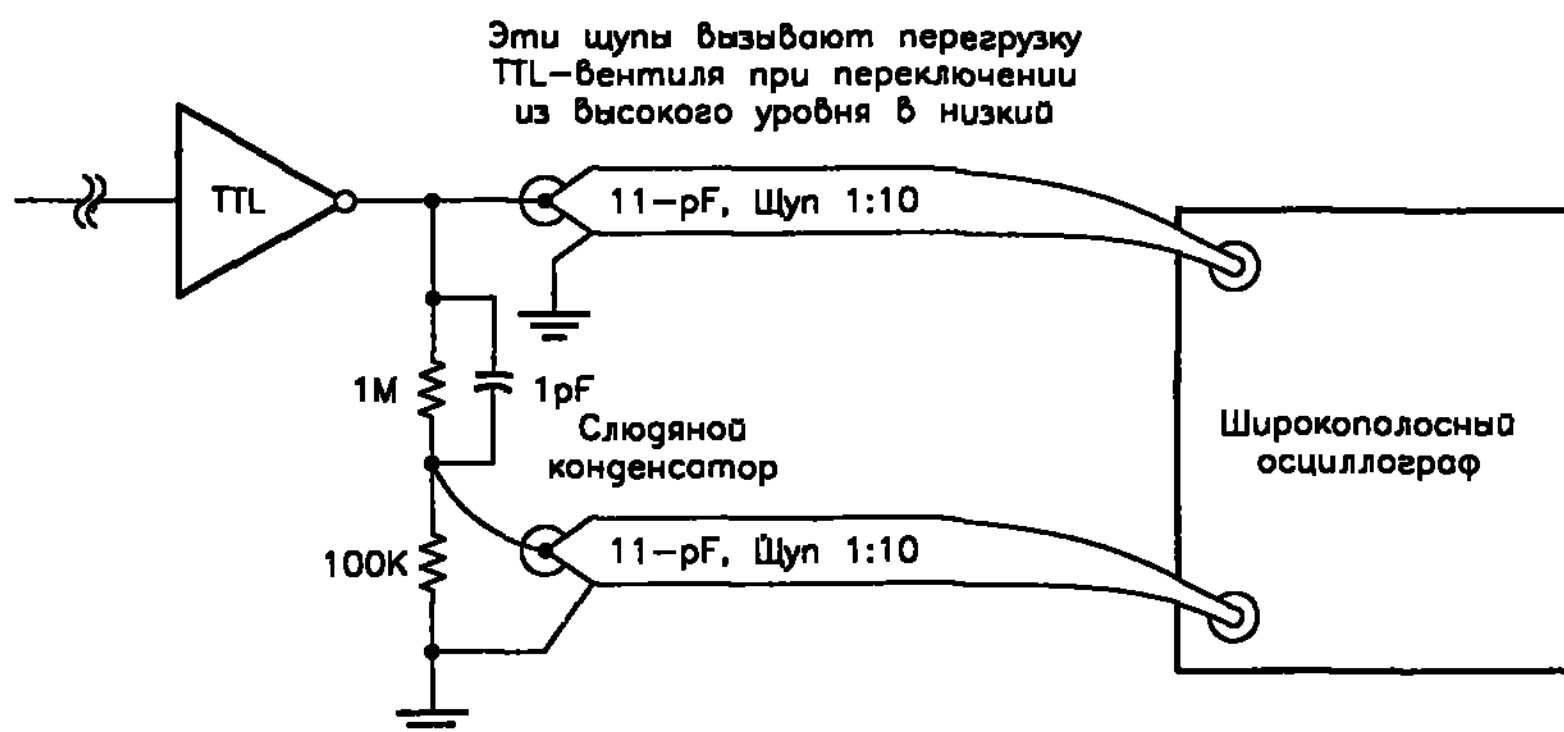


Рис. 10.5. Влияние емкости щупа

Обычный высокоомный щуп может вызывать появление выбросов на выходах ТТЛ устройств, которые исчезают в тот момент, когда наблюдение прекращается. От такого эффекта можно избавиться, изготовив самостоятельно щупы с очень высоким сопротивлением, обладающие емкостью нагрузки всего 1 пФ.

высоким входным сопротивлением, всегда есть вероятность, что, снимая параметры сигнала, вы сами можете серьезно повлиять на них, в том числе тогда, когда наблюдаемый сигнал представляется абсолютно естественным и соответствующим нормальному выходному сигналу ТТЛ элемента. Вот почему нужно быть постоянно готовым к изготовлению собственного, предназначенного для решения конкретной задачи, щупа, с помощью которого вы сможете узнать, что же на самом деле происходит в исследуемой схеме.

Когда я работаю с цифровыми интегральными микросхемами, мне бывает крайне неуютно, если не получается прорисовать заранее все сигналы в микросхеме, показав при этом их взаимосвязь и соотношения. Поэтому я строю диаграммы на больших листах кадрильной (quadrille) бумаги (с сеткой размером в четверть дюйма). В результате получается то, что я называю «хореографией» (по аналогии с кадрили): я изображаю, как, по моему мнению, сигналы должны себя вести, а также где и когда именно они должны «сделать» очередное па-танца или «закружиться в пируэте». Если же предполагается, что система будет очень объемной, я обычно склеиваю вместе два, три или четыре листа по горизонтали и вертикали. Можете себе представить, какой ужас я навожу на окружающих, когда перетаскиваю какого-нибудь из этих монстров к копировальному аппарату, а затем пытаюсь придумать, как снять с него копию (рис. 10.6).

Интересный факт: когда я впервые опубликовал такую диаграмму, то на ней обнаружилась ошибка – часть нарисованных импульсов была неверно расположена на шкале времени. Я сам сделал ошибку на диаграмме, ее никто не заметил вплоть до выхода издания из печати, и только в последний момент начинающий инженер ее обнаружил. Мне было очень стыдно. Конечно, было бы еще хуже, если целая толпа читателей стала бы мне писать и звонить, сообщая о моей оплошности. Всю эту историю я привожу специально, чтобы показать, что у того, кто самоуверенно вещает с высокой трибуны, есть большая ответственность, так как

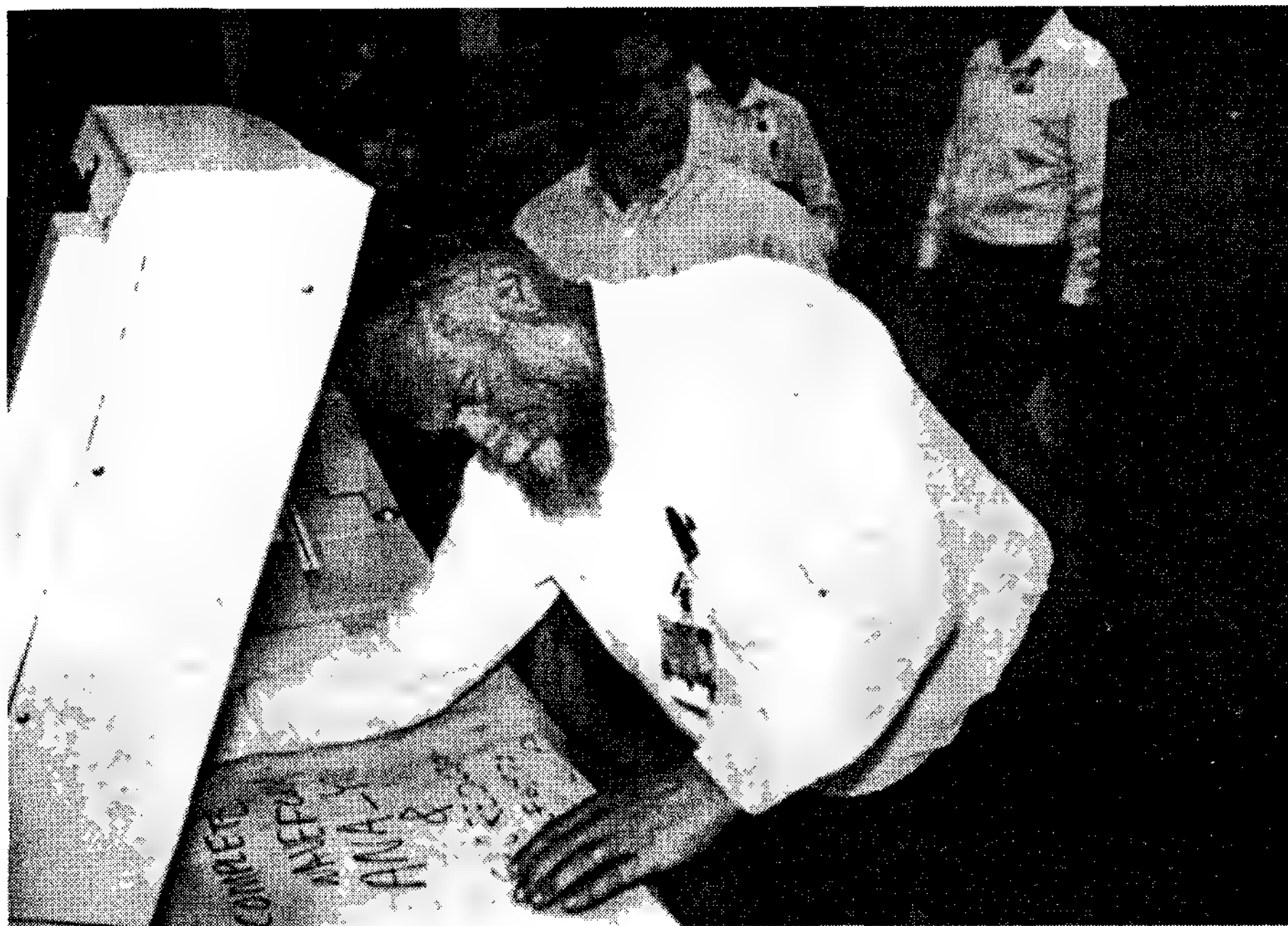


Рис. 10.6. Коллеги автора выражают свое недовольство, так как он притащил одну из своих огромных «хореограмм» к фотокопировальному аппарату и пытается придумать, каким образом ему снять копию с такой большой схемы

слушатели (или читатели) обычно доверяют профессионализму и компетентности. Они начинают думать, что ты не можешь ошибиться, и тогда... сами совершают ошибку. Что ж, все мы не безгрешны.

Специалисты, разрабатывающие действительно большие цифровые интегральные схемы, наверное, могут обойтись и без этой «хореографической» технологии. Может быть, они используют другие мнемонические способы разработки, но я пользуюсь именно тем, о чем рассказал выше. Эту методику я впервые опробовал в далеком 1975 году, когда проектировал 12-разрядный полупроводниковый АЦП, ставший первым в истории серийным изделием такого типа. Я начертил большую «хореографию» площадью 33×33 дюйма, и схема с первого раза заработала, так как построенная временная диаграмма помогла избежать путаницы с цифровыми сигналами. В настоящее время я разрабатываю целую систему, по которой используется три «хореографии»: одна в наносекундах и десятых долях наносекунд привязана к другой, размеченной в микросекундах, а та – к третьей, в секундах. Всякий раз я просто чудом не запутываюсь во всем этом ворохе бумаг.

10.6. Работа с ЦАП

Цифро-аналоговые преобразователи – это очень простые устройства, и обычно при их использовании можно без особых затруднений получить отличные результаты. Если такой преобразователь грамотно спроектирован и вы применяете его

в соответствии с техническими описаниями и руководствами по применению, то больших неприятностей, связанных с работой ЦАП, обычно не возникает.

Однако, если что-нибудь и может вызвать проблемы с применением этих преобразователей, так это шумы. В отношении шумов для большинства ЦАП не приводится никаких данных, а также не дается никаких гарантий на то, что они не подвержены влиянию высокочастотных шумов или бросков напряжения в цепях питания.

В некоторых случаях подавление нежелательных помех по цепям питания постоянного тока может достигать от 80 до 100 дБ, однако высокочастотный шум в цепи иногда проходит на выход практически без ослабления. Это говорит о том, что при проектировании схемы надо быть очень внимательными. В высокоточной системе неплохим решением было бы использование абсолютно отдельного стабилизатора для питания прецизионного ЦАП. Вы должны сделать совсем немного – установить достаточное количество фильтрующих питание развязывающих керамических и танталовых конденсаторов высокого качества прямо на выводах питания. Когда данные передаются непосредственно на ЦАП, без применения буферных схем, случается, что такие неприятные явления, как шумы, звон и медленное установление уровня цифровых сигналов, могут проявиться и в аналоговой части на выходе ЦАП. К сожалению, никто не выпускает нормативной литературы и тем более технических условий на подавление шумов на цифровых входах ЦАП, находящихся как в ВЫСОКОМ, так и в НИЗКОМ логических уровнях. Я помню случай, когда мне пришлось дополнительно нагружать ТТЛ выводы внутренних регистров промежуточной памяти модульного ЦАП, заземлив каждую из разрядных линий через резисторы сопротивлением 2 кОм. Иначе при переходе в ВЫСОКИЙ логический уровень они были бы перегружены, а восстановление после перегрузки сопровождалось бы длинным-длинным «хвостом», который в ослабленном варианте проявился бы и на выходе ЦАП.

Встроенные буферы на входах ЦАП позволяют частично ослабить проникновение сигналов с разрядных цифровых линий на аналоговый выход, но полностью это исключить не получится. Сигнал на шине может постоянно изменяться, и тогда емкостная связь или утечка сигнала по печатной плате будут время от времени вызывать паразитную передачу заметного сигнала на аналоговый выход. Образованию шумов такого типа могут способствовать даже панельки для интегральных схем. Если бы удалось сделать так, чтобы шум не оказывал влияния на работу вашей схемы, то про него можно было бы просто забыть. Проблема заключается в том, что значимые результаты измерений параметров этого эффекта можно получить только на работающем прототипе – на компьютере подобное смоделировать не удастся.

Множительные ЦАП хорошо известны и имеют очень широкую область применения. Несмотря на это, линейность множительного ЦАП может нарушиться, когда сдвиг выходного напряжения усилителя будет заметно отличаться от нуля. Я слышал, что это отклонение от линейности приблизительно оценивается как 0,01% на милливольт смещения нуля. К счастью, в настоящее время операционные усилители с небольшим напряжением сдвига стоят совсем недорого, во всяком случае дешевле подстроечного резистора.

Передаточная характеристика множительного ЦАП по переменному току для различных кодов на входе тоже далеко не идеальна. Возьмем в качестве опорного напряжения синусоидальный сигнал частотой 30 кГц. Тогда вам не стоит сильно удивляться, если при изменении входного кода от 1000 0000 на 0111 1111 изменение коэффициента передачи опорного напряжения на аналоговый выход преобразователя окажется больше, чем должно было быть при изменении цифрового кода на один младший разряд. На самом деле, если частота опорного напряжения превосходит 5 кГц, то ошибка может составлять от 0,2% и выше. Это вызвано тем, что коэффициент ослабления многозвенных взвешивающих цепочек множительного ЦАП, являясь линейной функцией от входного цифрового кода на постоянном токе, из-за паразитных емкостей становится немного нелинейным на высоких частотах. Эта нелинейность может достигать 0,2%, а фазовые ошибки при изменении входных кодов – превышать 2° даже при частоте опорного напряжения 5 кГц.

Еще одна неприятность, связанная с ЦАП, – это кратковременные выбросы или всплески напряжения выходного сигнала, которые могут происходить при смене определенного значения кода на одно из соседних. Пусть значение входного кода ЦАП изменяется с 1000 0000 на 0111 1111 и задержка переключения, необходимая для установки значения бита в высокий уровень, значительно отличается от задержки переключения, необходимой для установки его в низкий уровень. В таком случае уровень выходного сигнала ЦАП, перед тем как принять значение, соответствующее выставленному коду, на короткое время может достигнуть максимально допустимого положительного или отрицательного значения полной шкалы. Одним из возможных способов решения проблемы является применение прецизионной системы синхронизации для управления ЦАП. Вполне подойдет и схема с использованием многотактных промежуточных регистров-защелок. Тем не менее если полная синхронизация всех процессов будет все же недостаточной, то решить проблему можно с помощью специальной схемы подавления выбросов.

10.7. Проблемы с АЦП

Как и ЦАП, большинство аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) выполняют именно те функции, для которых они предназначены, так в чем же тогда могут быть проблемы? Многие проблемы связаны с тем, о чем рассказывается лишь в некоторых технических описаниях, – с шумом. Было бы здорово, когда в процессе медленного изменения аналогового сигнала на входе от одного уровня к другому АЦП выдавал бы только код, соответствующий первому уровню напряжения, а затем, при переходе уровнем сигнала соответствующего порога, начинал бы выдавать только код для другого уровня входного напряжения. Существует некая переходная область, где наличие шумов приводит к тому, что АЦП начинает выдавать неверные коды в тех случаях, когда этого делать не следовало бы. У высококачественных АЦП двойная амплитуда шумовой составляющей может составлять всего 0,1 или 0,05 младшего двоичного разряда. При неблагоприятном стечении обстоятельств (что часто наблюдается в преобразователях последовательного приближения при переключении старшего или близких к нему разрядов, к примеру, если выходной код изменяется с 1000 0000 на 0111 1111) шум

может усиливаться и его двойная амплитуда может иногда достигать половины младшего двоичного разряда или даже больше. Я не стал бы применять АЦП, не зная, насколько высок у него уровень шумов. Мне бы пришлось измерить шум самостоятельно, используя схему, показанную на рис. 10.7, так как на самом деле в технических описаниях о нем ничего не сказано. Это не означает, что все выпускающиеся АЦП плохого качества. Это означает, что производители АЦП просто не очень-то распространяются о шумах. Рон Кнепп (Ron Knapp) из компании Maxim недавно опубликовал в EDN отличную статью, в которой рассказывалось о технологии измерения уровня шумов в АЦП [3]. Я рекомендую ознакомиться со статьей всем, кого заинтересовал этот вопрос.

В технических описаниях многих АЦП говорится, что для правильного тестирования или использования этого устройства необходимо непосредственно на выводе земли АЦП соединить вместе землю аналогового сигнала, землю аналогового питания и землю цифрового питания.

10.8. «Бумажные проекты» не для АЦП

С одним из разработанных мной АЦП произошла вот такая история. Наш клиент столкнулся с проблемой, которую мне не удалось воспроизвести в лаборатории. Тогда я купил два билета на самолет – один для себя и второй для самого лучшего из имевшихся у меня осциллографов. Через несколько часов полета я оказался на месте, и менее чем через час после этого суть проблемы была определена. Заказчик хотел, чтобы наш преобразователь удовлетворял всем техническим условиям при напряжении между землей аналоговой части и землей цифровой части, равном 0,2 В постоянного тока плюс 0,2 В переменного тока и частотой 5 МГц!!! Но, как ни удивительно, наше устройство было спроектировано таким образом, что, удалив один резистор и добавив один конденсатор, я смог выполнить требования заказчика. Конструкция большинства АЦП не позволяет адаптировать их к различным условиям работы. Этому заказчику фантастически повезло: создавая устройство, я как будто бы предвидел подобные события. В этой конструкции я использовал высокоскоростной интегрирующий преобразователь с входным преобразователем напряжения в ток, за счет которого совершенно случайно удалось отфильтровать широкополосные шумы и исключить влияние разности напряжений постоянного тока между землями различных сигналов.

Из этого можно сделать следующий принципиальный вывод: АЦП – совсем не простые системы и должны проектироваться путем объединения в единое целое различных преобразовательных схем. «Бумажные разработки» в этой области сразу «размокают» на практике.

Для того чтобы отказаться от необходимости обеспечивать каждый АЦП (задача которого – снабдить энергией один-единственный преобразователь) персональным набором источников питания, вы можете подавать на разрабатываемые вами платы нестабилизированное или плохо стабилизированное питание. А около каждого АЦП устанавливать небольшой интегральный стабилизатор. Малогабаритные интегральные микросхемы (LM320L15, μ A78L05, LM317L или др.) обладают невысоким коэффициентом подавления пульсаций напряжения питания

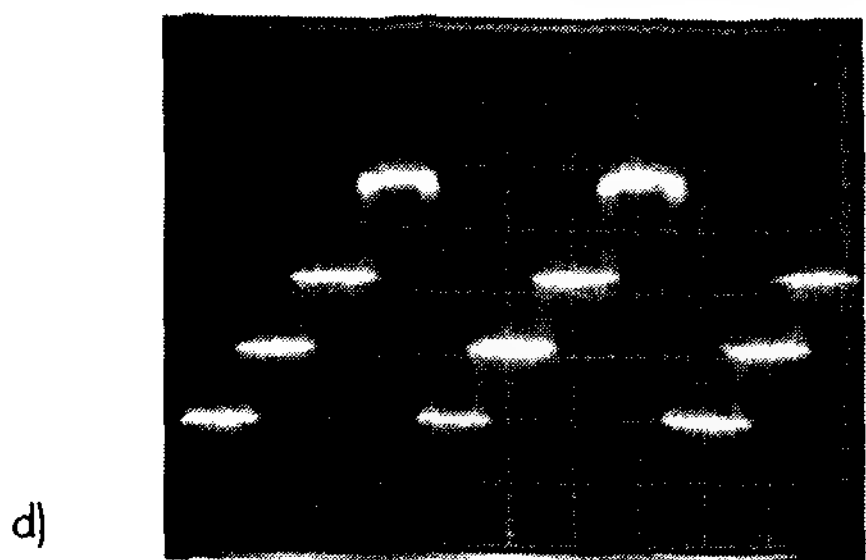
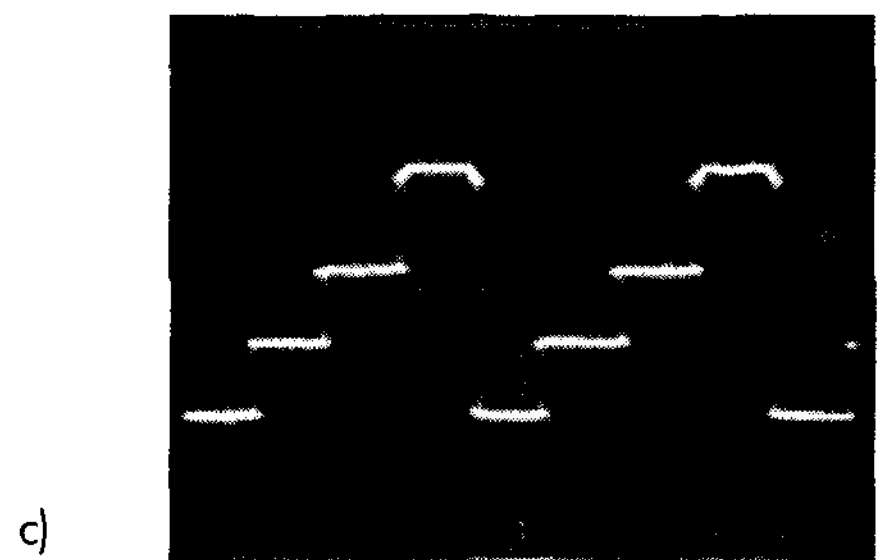
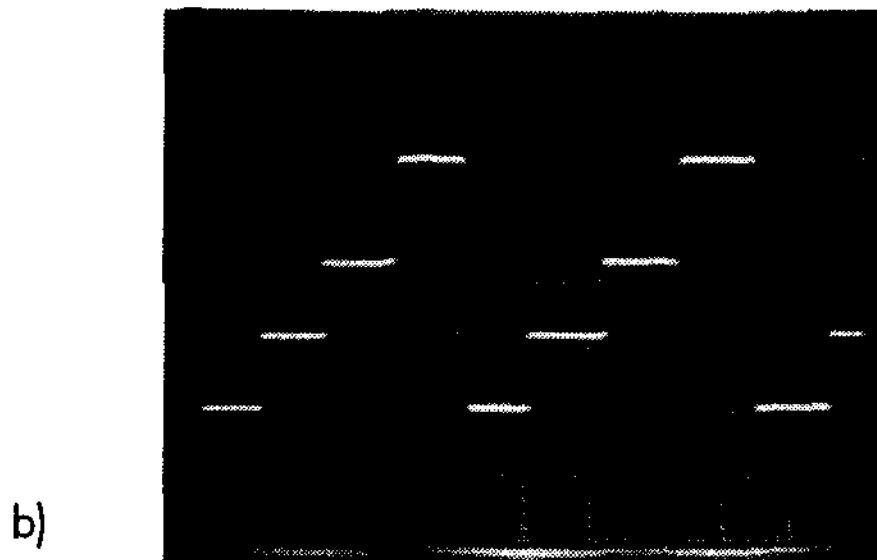
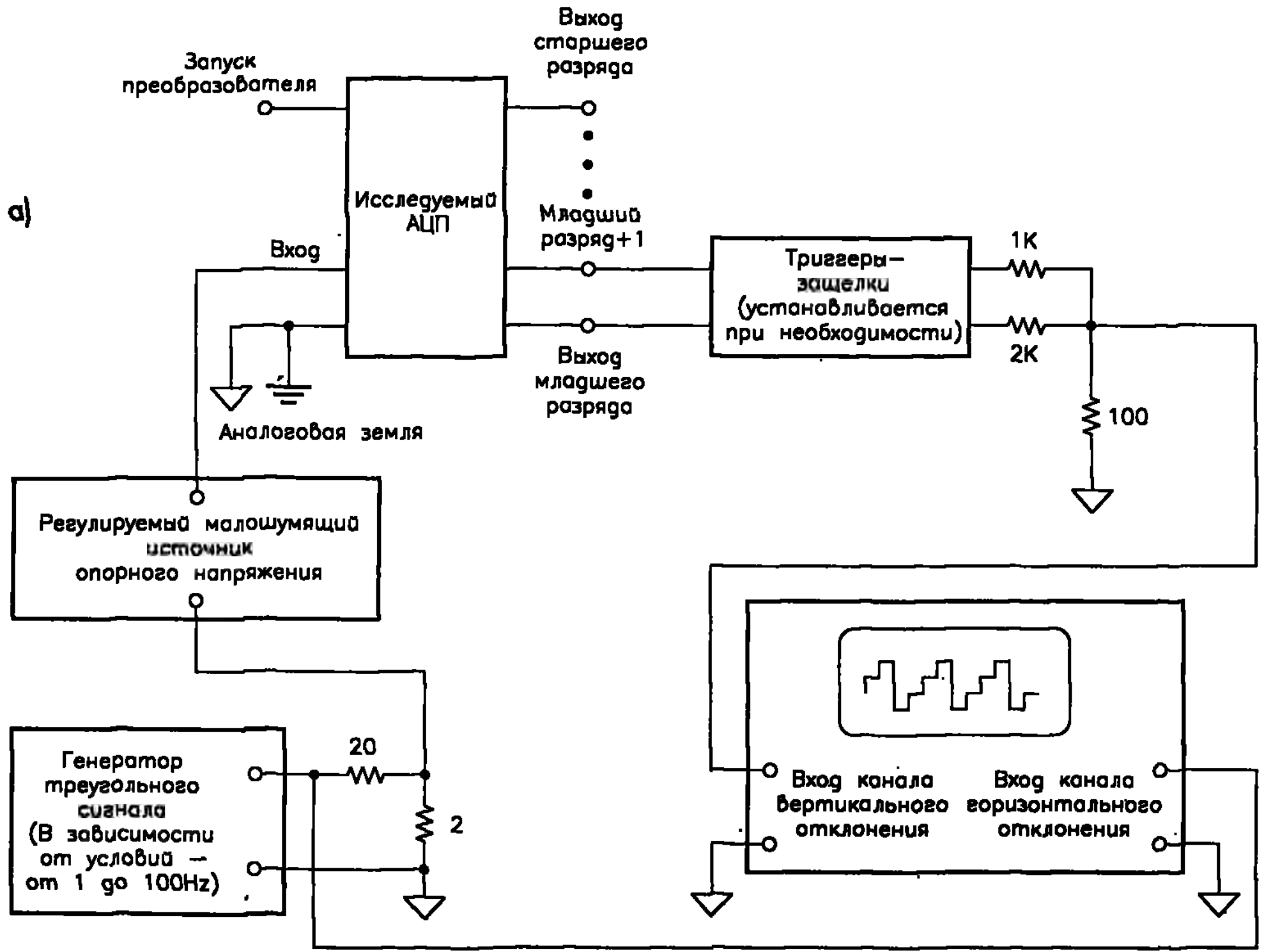


Рис. 10.7. Качество работы АЦП

Основные компоненты схемы для двухкоординатного тестирования АЦП: источник опорного напряжения, генератор треугольных импульсов и осциллограф (а), позволяющий определить уровень шума, добавляемого преобразователем к оцифровываемому сигналу. На осциллограмме (b) уровень шумов идеален, на осциллограмме (c) соответствует допустимому уровню шумов. Осциллограмма (d) соответствует преобразователю с недопустимо высоким уровнем шумов.

на высоких частотах. Эту проблему можно решить с помощью развязок, так что у вас есть шанс заставить такую схему работать. Однако поспешу отметить, что сам я не часто использовал подобные схемы.

10.9. Земляная петля

Необходимость использования нескольких (независимых) источников питания или, по меньшей мере, нескольких стабилизаторов напряжения возникает, очевидно, из-за множества цепей, по которым возвратные токи земли втекают и вытекают из источников питания. Если вы не будете тщательно отслеживать раздельность этих цепей, то паразитные земляные петли могут вызвать сильные перекрестные помехи между различными частями системы – малосигнальной аналоговой, аналоговой большой мощности и цифровой. Так что будьте очень внимательны и не допускайте, где это возможно, образования паразитных петель такого рода. Поиск решения проблемы паразитных земляных петель мог бы стать отличной темой для диссертации на степень доктора философии, хотя руководство электро- или радиотехнического факультета в вашем местном университете вряд ли согласится с этим. Если вы напишете диссертацию на эту тему, то, пожалуйста, не забудьте отправить мне копию.

В некоторых АЦП, в частности в преобразователях последовательного приближения, сигналы на каждый цифровой выход передаются через отдельный буферный каскад, но разработчики некоторых моделей, стараясь уменьшить затраты, количество навесных элементов, энергопотребление или занимаемую на плате площадь, используют внутренние регистры для подачи сигналов как на внутренний ЦАП, так и на выходные выводы. В последнем случае внешняя нагрузка на выходах может привести к увеличению времени установления уровня напряжения и возрастанию уровня шумов, тем самым к снижению эффективности преобразователя. Если вы используете АЦП, то вам следует выяснить, не связаны ли выводы цифровых выходов напрямую с внутренним ЦАП. В ряде случаев, как уже упоминалось, подключение дополнительной нагрузки ко всем выводам, соответствующим битам, может ускорить процесс установления уровня напряжения на встроенном в АЦП преобразователе ЦАП. TTL выходы должны отдавать ток большей величины, чем записано в технических характеристиках по постоянному току, то есть соответствовать параметрам по переменному току.

10.10. ПНЧ

Преобразователь напряжение-частота – очень известная разновидность АЦП. Особенно часто он используется в тех случаях, когда необходимо гальванически изолировать аналоговый вход от цифрового выхода. Для того чтобы обеспечить независимость различных контуров заземления, вы с легкостью можете передавать выходную последовательность импульсов преобразователя напряжения-частота через оптопару. Преобразователи напряжение-частота могут перекрывать

широкий диапазон частот с динамическим диапазоном от 14 до 18 бит. Чем дешевле эти преобразователи, тем они медленнее работают, самые быстродействующие могут стоить очень дорого. Большинству преобразователей напряжение-частота свойственна отличная линейность, но она зависит от того, насколько низкой диэлектрической абсорбцией обладает времязадающий конденсатор. Оптимальными для этих целей считаются фторопластовые конденсаторы, однако при использовании полистирольных, полипропиленовых или керамических конденсаторов с группой ТКЕ С0G получаются результаты не намного хуже. (В качестве примера можете познакомиться с техническими описаниями на микросхемы LM131/LM331.)

Отрегулировать преобразователь напряжение-частота так, чтобы у него был низкий температурный коэффициент, непросто, потому что значение общего температурного коэффициента зависит от нескольких переменных, в том числе и от стабильности источника опорного сигнала, а также от различных временных задержек. Если вы хотите узнать о технологии регулировки преобразователей напряжение-частота или, по крайней мере, оценить, каких трудозатрат вам удастся избежать при покупке хорошо настроенного преобразователя, советую обратиться к [4].

10.11. ПЧН

Преобразователи частота-напряжение часто используются в качестве тахометров либо совместно с преобразователями напряжение-частота и оптопарами для обеспечения гальванической развязки в аналоговых системах. Преобразователи частота-напряжение обладают почти такой же линейностью, как и преобразователи напряжение-частота. Температурный дрейф у преобразователей этих двух типов тоже практически одинаков, вот почему проблемы регулировки общего температурного коэффициента очень сложны, с одним исключением – если используются каскадированные пары преобразователей напряжение-частота и частота-напряжение, в которых оба устройства расположены в одном и том же месте и работают при одинаковой температуре. В таком случае проблему можно решить, отрегулировав только один блок из пары или просто обеспечив взаимное соответствие температурных коэффициентов!

С преобразователями частота-напряжение связана еще одна сложность: вам часто необходима максимально быстрая отработка, но перерегулирование должно оставаться предельно малым. При разработке фильтра, который удовлетворял бы обоим требованиям, придется, безусловно, идти на компромиссы. Я применяю следующее эмпирическое правило: можно удерживать пульсации на уровне 0,01% от напряжения полной шкалы $V_{\text{пш}}$, но при использовании простейших фильтров несущая частота должна как минимум в 100 раз превосходить $F_{\text{мин}}$. При использовании более сложных фильтров, таких как два включенных последовательно фильтра Саллена-Кея, частота среза по уровню -3 дБ может соответствовать $1/10$ минимальной частоты несущего сигнала. К примеру, при несущей частоте в диапазоне 5–10 кГц частота сигнала может изменяться от постоянного тока до 500 Гц [5]. Если вам требуется система с еще более быстрой обработкой, то прочитайте статью [2], в которой на детально описанном примере рассказывается, как использовать простую систему фазовой автоподстройки частоты для реализации быстродействующего преобразователя частота-напряжение.

10.12. Устройства выборки-хранения: электронные стробоскопы

Выходной сигнал преобразователя напряжение-частота пропорционален среднему за время преобразования значению аналогового входного сигнала. Если нужно дискретизировать быстроменяющийся сигнал, к примеру представить сигналы различной формы в цифровом виде, вам потребуется АЦП другого типа и почти всегда придется предварять его схемой выборки и хранения. Разработка такой схемы – очень сложная задача. Для того чтобы схема удовлетворяла самым строгим требованиям, часто приходится использовать дорогую модульную или гибридную схему. Основной проблемой здесь является диэлектрическая абсорбция, или «натекание» накопительного конденсатора [6]. При работе схемы, в которой время получения выборки малое, а время хранения – очень большое, напряжение очередного выходного сигнала может значительно отличаться от предыдущей выборки и натекание может оказаться самой серьезной проблемой. Пусть, к примеру, схема выборки и хранения в течение 5 мкс производит выборку нового напряжения сигнала, а затем в течение 500 мкс его хранит. В таком случае вы способны приблизительно оценить предыдущий уровень сигнала, поскольку при переходе на новый уровень к напряжению V_{out} может добавиться смещение на 2–3 мВ – величина и направление его зависят только от параметров предыдущей выборки сигнала. И это верно для дорогих фторопластовых накопительных конденсаторов – у конденсаторов других типов натекание в три – пять раз хуже. Если временные параметры, частота и скорость выборки не изменяются, то вы сможете дополнительно установить схему, которая будет определенным образом компенсировать натекание [7]. Тем не менее эта проблема, так же как и ее решение, не является тривиальной.

Каскадирование двух схем выборки и хранения – быстродействующей и медленной, но с большим накопительным конденсатором – не позволяет решить проблему с натеканием, но, скорее всего, минимизирует утечки.

Иногда возникает потребность в том, чтобы схема выборки и хранения переходила бы из состояния получения выборки к состоянию хранения с пренебрежимо малым выбросом сигнала, или «иголкой».

Сделать это можно, но спроектировать такую схему гораздо сложнее, чем схему выборки и хранения с менее экзотическими характеристиками. Обычно схема, в которой отсутствуют «иголки», встречается в устройствах подавления выбросов, которые стоят намного дороже, чем схемы выборки и хранения. Прецизионные устройства такого типа изготавливаются в виде модулей или гибридных микросхем. Несмотря на то что уровень сигнала в схемах подавления выбросов устанавливается не моментально, они работают быстро и согласованно. Однако некоторый промежуток времени все же требуется для того, чтобы сигнал установился с точностью до 5 мВ.

10.13. Время апертуры

В технических описаниях схем выборки и хранения есть «покрытая туманом» область, относящаяся к реальным значениям апертурной задержки. (Быть может, в один прекрасный день я напишу соответствующие технические описания и разгону

тучи. Попросите меня показать технические описания на микросхему LF6197...) Один из методов определения и измерения длительности апертурной задержки заключается в том, что напряжение V_{in} удерживается на постоянном уровне и устройство переключается в режим хранения. Если после небольшой задержки напряжение V_{in} резко изменяется на несколько вольт, то с помощью минимального промежутка времени, прошедшего между переключением схемы в режим хранения и скачком напряжения V_{in} , который не повлечет за собой ошибочного изменения выходного напряжения V_{out} , можно определить время апертурной задержки.

Существует и другой способ: напряжение V_{in} плавно изменяется с хорошо известной скоростью. Вскоре после того, как будет выдана команда на переключение схемы в режим ХРАНЕНИЕ, напряжение V_{out} перестанет изменяться. Уровень, при котором напряжение V_{out} перестало изменяться, соответствует величине напряжения V_{in} в конкретный момент времени. Апертурную задержку можно определить как промежуток времени между этой точкой и моментом пересечения порогового уровня для входа управляющей логики сигналом на переключение схемы в режим хранения. Неопределенность величины апертурной задержки, таким образом, является неопределенностью апертуры. В зависимости от того, насколько тщательно была оптимизирована схема, эта задержка может быть положительной, отрицательной или практически нулевой.

Я думаю, что в разных ситуациях специалисты могут воспользоваться любой из двух приведенных характеристик. Но как избежать неприятностей, возникающих в тех случаях, когда предполагается, что используется одно описание, а на самом деле – другое? Хотелось бы услышать ваши замечания о том, какой вариант вы бы предпочли использовать и где найти точное определение. Я просмотрел и требования к оборудованию военного назначения, и технические описания разных устройств, но этот вопрос мне до сих пор неясен.

Проблемы со схемами выборки и хранения могут возникнуть еще и в тот момент, когда выходной сигнал схемы подается на мультиплексор. К примеру, когда несколько схем выборки и хранения используются для подачи сигнала на один общий АЦП, чтобы достигнуть одновременной дискретизации нескольких каналов с быстроменяющимися аналоговыми данными. В случае, если к этому мультиплексору, где напряжение составляло, скажем, +10 В, резко подключается выход схемы выборки и хранения, уровень сигнала на котором равен –10 В, то произойдет скачок выходного сигнала. Затем выходной сигнал может оказаться на ложном уровне, так как с мультиплексора через схему выборки и хранения на накопительный конденсатор перейдет небольшой дополнительный заряд. Являющаяся промышленным стандартом интегральная микросхема LF398 отлично подходит для работы с мультиплексорами, однако если вы установите на выходе мультиплексора конденсатор большой емкости – примерно 75 пФ – и он будет заряжен до уровня, более чем на 10 В превышающего выходное напряжение схемы выборки и сравнения, то скачок выходного сигнала может произойти и у LF398. Я не справился с данной проблемой. Попробуйте уменьшить выходную емкость мультиплексора – и это практически все, что я могу порекомендовать. Один из способов, позволяющих это сделать, заключается в использовании древовидной структуры из субмультиплексоров.

10.14. Время выборки

Еще одним вызывающим споры параметром схем выборки и хранения является время выборки. Мне встречались технические описания, где время выборки определялось как промежуток времени, необходимый для того, чтобы схема из состояния ХРАНЕНИЯ перешла в состояние ВЫБОРКИ и выходной сигнал был на уровне, соответствующем новому значению V_{in} , которое выставлено для режима ВЫБОРКИ.

Однако при использовании самых различных схем выборки и хранения новый уровень их выходного напряжения может установиться еще до того, как закончится заряд накопительного конденсатора и напряжение на нем достигнет нужного значения. Если схема выборки и хранения переключается в состояние ХРАНЕНИЯ именно в таких условиях, это может привести к неверным результатам работы даже тогда, когда схема будет находиться в состоянии ВЫБОРКИ, при этом создастся впечатление, что у выходного сигнала корректный уровень. Чтобы избежать путаницы, мы определяем время ВЫБОРКИ как длительность импульса, необходимого для точного выполнения операции выборки и хранения сигнала. Ведь если происходит ВЫБОРКА, затем установление выходного уровня и переход в состояние ХРАНЕНИЯ, а на выходе получается неверный результат, то это означает, что длительность импульса ВЫБОРКИ должна быть больше – разве не так? Именно так.

Существуют также схемы выборки и хранения, у которых выходное напряжение не изменяется, если вы переключаете их в режим ХРАНЕНИЯ сразу же, как только выходной сигнал достигнет уровня, соответствующего новой величине входного напряжения (V_{in}). Я считаю, что те проверки и испытания, о которых говорится в данном определении, слишком просты. Мне кажется, что отдельные производители, работающие в этой области, и покупатели, заинтересованные в таких устройствах, согласятся с моей формулировкой. Однако этот вопрос еще не решен до конца. (Я с большим удовольствием послушал бы ваши комментарии по этому поводу.)

10.15. Мультиплексор

Как уже упоминалось, из-за резких изменений тока потребления в мультиплексоре могут образовываться короткие импульсы значительного тока, если вы резко подадите на него сигнал большой амплитуды при малом сопротивлении нагрузки. Так что постарайтесь не переусердствовать, заставляя мультиплексор работать в тяжелых режимах, потому что при этом могут возникнуть токи слишком большой величины, что приведет к повреждениям схем или искажению результатов. Параметрами, влияющими на качество мультиплексоров, как и аналоговых электронных ключей других типов, являются уровень утечки, сопротивление в открытом состоянии и время срабатывания. Однако эти устройства широко используются и с ними не возникнет особых проблем до тех пор, пока вы не отключите питание, не прервав перед этим подачу входных сигналов. Я хочу напомнить, что в течение последних лет как минимум один или два производителя выпустили новые модели, которые могли бы выдержать с отключенным питанием довольно

большие перегрузки по напряжению. Я не могу точно сказать, что, помимо тонкопленочных резисторов и ограничивающих диодов на входах, используется в цепях защиты перед МОП ключами в этих новинках. Однако если вы сами установите дискретные резисторы перед входами какого-нибудь полупроводникового мультиплексора, то благодаря им мультиплексор, вполне вероятно, выдержит отключение питания.

Еще одной проблемой, связанной с мультиплексорами, является то, что вы не можете в полной мере контролировать порог и время разрыва цепи при переключении (break-before-make). И я не уверен, что вам удастся найти подходящий вариант исполнения, если потребуется «безобрывный» режим работы (make-before-break), при котором во время переключения не происходит разрыва цепи. Так что иногда вам придется самостоятельно создавать мультиплексор особой конструкции.

Если в схеме двойная амплитуда сигналов не превышает 15 В, то, возможно, вам подойдут широко распространенные аналоговые мультиплексоры CD4051 CD4053 и аналоговые КМОП ключи CD4066, которые стоят недорого, работают быстро и обычно имеют небольшие уровни утечек. Тем не менее, если нужна гарантированно низкая утечка, то вам следует протестировать и отобрать подходящие устройства.

10.16. Электронные цифровые вычислительные машины

Чтобы не наговорить лишнего, скажу только, что книгу по поиску неисправностей в этих устройствах должен написать кто-нибудь другой.

10.17. Программное обеспечение

Без комментариев, просто НЕТ слов...

Итак, мы прощаемся с аналогово-цифровым миром – точнее, с его частью. В следующей главе мы рассмотрим другую область – абсолютно линейную и аналоговую, к которой относятся источники опорного напряжения. Вооружившись знаниями об этих устройствах, мы перейдем к вопросам поиска неисправностей в силовых электронных схемах, например в импульсных стабилизаторах.

Литература

1. Jung, Walter, *555 Timer Cookbook*, Howard Sams and Co, Indianapolis, IN, 1977.
2. Pease, Robert A., “Wideband phase-locked loops take on F/V-conversion chores”, *EDN*, May 10, 1979, с. 145. (Также входит под рубрикой AN-210 в книгу “*Linear Applications Book*” фирмы National Semiconductor, 1986, 1989 и т. д. “New Phase-locked-loops Have Advantages as Frequency-to-Voltage Converters (and more)”).
3. Knapp, Ron, “Evaluate your ADC by using the crossplot technique”, *EDN*, November 10, 1988, с. 251.
4. Pease, R. A., “Versatile monolithic V/Fs can compute as well as convert with high accuracy”, *Electronic Design*, December 6, 1978, с. 70. (Также входит в качестве

- приложения F в книгу "*Linear Applications Book*" фирмы National Semiconductor Corp., Santa Clara, CA, 1986, с. 1213.)
5. Pease, R. A., "V/F Converter ICs handle frequency-to-voltage needs", *EDN*, March 20, 1979, с. 109. (Также входит в качестве приложения C в книгу "*Linear Applications Book*" фирмы National Semiconductor Corp., Santa Clara, CA, 1986, с. 1207.)
 6. Pease, R. A., "Understand capacitor soakage to optimize analog systems", *EDN*, October 13, 1982, с. 125.
 7. National Semiconductor Corp., *Linear Databook 2*, Santa Clara, CA, 1986, с. 5-5.

11. ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СТАБИЛИЗАТОРЫ

В качестве основы для многих источников опорного напряжения применяются схемы на принципе напряжения запрещенной энергетической зоны, но в некоторых лучших моделях используются полупроводниковые интегральные стабилизаторы в скрытом подслое. Для источника питания, выходное напряжение которого 8–12 В или же превышает эту величину, высокую стабильность, низкий уровень шумов и низкий температурный коэффициент напряжения могут обеспечить такие модели источников опорного напряжения на полупроводниковых интегральных стабилизаторах, как LM329, LM399 или LM369. Если источник питания – низковольтный (с выходным напряжением от 8 до 1,1 В), то можно подобрать источники опорного напряжения на принципе запрещенной зоны, которые будут выдавать стабильное напряжение 0,2–5 В с достаточной эффективностью и экономичностью. У таких устройств очень низкий температурный коэффициент напряжения – всего лишь $20\text{--}10\text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. (Для них характерен довольно большой уровень шумов, так что использование дополнительного фильтра может значительно улучшить качество работы источника.)

Для качественного источника опорного напряжения с полупроводниковыми интегральными стабилизаторами в скрытом слое характерна долговременная стабильность параметров, по сравнению с источником, использующим схемы на основе принципа напряжения запрещенной энергетической зоны (параметры хорошо спроектированных моделей на стабилизаторах изменяются всего на $5\text{--}10\text{ млн}^{-1}$ за месяц). Однако, если вы хотите добиться максимальной стабильности, то для этого нужно предварительно «выдержать» источники опорного напряжения, провести их «приработку» и термоциклирование. Кроме того, вы должны выявить те устройства, параметры которых все-таки отклоняются от начальных значений на $10\text{--}20\text{ млн}^{-1}$ за неделю, – всегда может попасться несколько экземпляров, более склонных к дрейфу, чем все остальные. К сожалению, другого способа отделить стабильные экземпляры от нестабильных, кроме как провести измерения в течение нескольких сотен часов, никто не придумал.

11.1. Стабилизаторы

За последние 10 лет стабилизаторы напряжения на интегральных микросхемах стали более удобными для использования. Со многими вообще никаких проблем не возникает. Тем не менее я и мои коллеги часто получаем сообщения о плохой работе интегрального стабилизатора. Возмущенный голос в трубке негодует: «Он греется». Мы отвечаем: «А какого размера радиатор вы с ним используете?» Голос в трубке недоумевает: «Радиатор? Вы о чем?» Я уверен, что у каждого, кто взял эту книгу в руки, достаточно здравого смысла, чтобы понять, что нельзя рассеивать большую мощность на маленьком стабилизаторе, не прикрепив его к достаточно большому радиатору или иному теплоотводу. Так что с этим устройством практически не возникает проблем, потому что в интегральных стабилизаторах напряжения предусмотрено все или почти все, что необходимо для их защиты от опасностей окружающего мира.

У вас неизбежно возникнут сложности со стабилизаторами, если вы не обеспечите необходимую фильтрацию и развязку на выходе. Для нормальной работы большей части стабилизаторов отрицательного напряжения, а также стабилизаторов других типов, к примеру стабилизаторов с малым падением напряжения на регулирующем элементе, необходимо установить большой фильтрующий электролитический конденсатор между выходом и землей. Если вы установите танталовый конденсатор, то, возможно, хватит емкости 1–2 мкФ, при использовании алюминиевого электролитического конденсатора понадобится емкость 20–100 мкФ или какая-нибудь другая, упомянутая в технических описаниях и руководствах по применению.

Но во всех случаях при использовании любых известных мне компонентов электролитический конденсатор будет работать. А пленочный или керамический конденсатор — нет, потому что эквивалентное последовательное сопротивление таких конденсаторов слишком мало. А вот фильтр, образованный последовательно соединенными керамическим конденсатором емкостью 1 мкФ и резистором сопротивлением 1 Ом, скорее всего, будет функционировать при температурах, близких к комнатной. В таких условиях тангенс угла потерь у этой конструкции станет таким же, как тангенс угла диэлектрических потерь танталового конденсатора. Но если нагреть такую схему до +100 °С или остудить до –40 °С, то емкость керамического конденсатора значительно уменьшится (подробнее об этом рассказывается в главе 4) и стабилизатор снова окажется в неблагоприятных условиях. Такой конденсатор может стать причиной самовозбуждения стабилизатора или значительного звона на его выходе.



Рис. 11.1. Царь Запрещенной Зоны

Не так давно один из наших старших техников обнаружил, что выходное сопротивление по переменному току у интегрального стабилизатора LM317 сильно изменяется в зависимости от тока нагрузки, текущего через регулирующий транзистор. Мы всегда были уверены, что соответствующая кривая в технических описаниях на микросхемы LM117 была инвариантна относительно выходного тока, – и эта точка зрения оказалась ошибочной. Узнав об этом, мы выяснили, что и все остальные полупроводниковые интегральные стабилизаторы работали так же, имея индуктивную составляющую выходного сопротивления. Тем, кто хочет более подробно ознакомиться с этим явлением, я рекомендую статью Эрролла Дитса (Erroll Dietz) [1] (см. приложение С), так как наблюдаемая тенденция (склонность) индуктивной составляющей выходного сопротивления модулироваться выходным током поможет объяснить, почему в некоторых случаях стабилизаторы отлично работают, а в других, похожих, – гораздо хуже.

Еще одна неприятность со стабилизаторами может возникнуть в случае, когда вы устанавливаете внешний регулирующий транзистор для того, чтобы увеличить максимальный выходной ток. Так как в результате установки дополнительного транзистора увеличивается коэффициент усиления по постоянному току, то нет ничего странного в том, что для предотвращения самовозбуждения вам придется дополнительно установить на выход стабилизатора фильтрующий конденсатор большой емкости. Для некоторых устройств в старых технических описаниях компании National Semiconductor строго указывается, какая емкость должна быть у фильтрующих конденсаторов и какого типа должны быть дополнительные регулирующие транзисторы, однако многие из этих схем совершенно устарели. Когда потребитель обнаруживает, что транзистор 2N3234 уже не производится и не поставляется, то, скорее всего, использует вместо него более современный и высокочастотный, который склонен к самовозбуждению. В таком случае потребитель вполне мог бы пожаловаться по поводу «плохого коэффициента стабилизации по нагрузке» на постоянном токе, так как стабилизатор то входит, то выходит из режима самовозбуждения. (Кто-нибудь говорил о том, что вам не нужен осциллограф для решения проблем с постоянным током?)

Когда потребители обращаются с подобной проблемой и просят помощи, я не только объясняю, как избавиться от самовозбуждения, но и разъясняю принцип Пиза (см. главу 8). Как бы там ни было, в настоящее время многие инженеры пришли к выводу, что лучше использовать более мощные интегральные стабилизаторы (LM350 при 3 А, LM338 при 5А), так как дополнительный транзистор невозможно защитить от перегрева. Отсюда следует, что внешние силовые транзисторы потеряли популярность.

11.2. Проблема максимального напряжения

Любой стабилизатор можно вывести из строя, если подать на него слишком высокое напряжение. Если стабилизатор работает на индуктивную нагрузку или у источника питания схемы индуктивный характер, убедитесь, что в ней предусмотрены цепи «сброса излишков» тока нагрузки при изменении характера потребления в основной цепи. К примеру, когда вы используете интегральный стабилизатор

LM350 как простейшее зарядное устройство для аккумуляторов и на его входе в качестве сглаживающего фильтра установлен конденсатор емкостью всего несколько микрофарад, то короткое замыкание выхода на землю обычно имеет катастрофические последствия. При таком замыкании через стабилизатор будет течь непрерывно нарастающий ток от трансформатора, пока величина тока не достигнет порога срабатывания системы защиты от перегрузки, и сразу после этого на индуктивности трансформатора появятся импульсы амплитудой до 80 В, которые и разрушат микросхему LM350. Чтобы избежать подобного, необходимо установить на входе стабилизатора конденсатор емкостью 1000 мкФ.

Пользователи привыкли к тому, что у стабилизаторов уровень шумов выходного напряжения приблизительно равен 0,01% от номинального уровня постоянной составляющей выходного напряжения. Увеличение уровня шума в 2–3 раза, обусловленное дробовыми и фликкер-шумами, вызывает негодование у отдельных пользователей. Шансы встретить сильно шумящий стабилизатор крайне малы, так что когда действительно обнаруживается несколько шумящих устройств, это вызывает некоторый шок. К сожалению, ни одна из фирм, производящих интегральные стабилизаторы, не тестирует выпускаемые приборы и устройства на уровень шумов и не гарантирует, что покупатель никогда не увидит в продаже шумящий экземпляр. Так что, пожалуйста, не рассчитывайте на то, что устройства с большим уровнем шумов будут признаны неисправными или подлежащими замене. Если вам действительно необходимы мал шумящие интегральные микросхемы, то лучше всего держать в сейфе несколько отобранных и протестированных компонентов такого типа. И в тех случаях, когда у какой-нибудь из только что купленных деталей уровень шумов окажется чрезмерным, вы сможете воспользоваться вашими запасами.

11.3. Наихудший случай

Как-то раз я разрабатывал схему, которая должна была передавать сигналы на нагрузку 200 Ом (это не очень «тяжелая» нагрузка), подключаемую к удаленному концу кабеля типа RG174U длиной 2000 футов. В соответствии с техническими требованиями для тестирования схемы требовалось подать на передающий конец кабеля прямоугольный сигнал от источника с малым выходным сопротивлением. Я связался с инженером-разработчиком технических требований и предложил провести испытания от источника сигнала с выходным сопротивлением порядка 39 Ом для того, чтобы избежать сильного звона и отражений, возникающих в кабеле, который работает с несогласованным источником и нагрузкой. Он ответил, что в этом сопротивлении нет необходимости, так как испытания уже проведены для наименее благоприятных условий: когда никакого кабеля не подключено и когда подключен кабель длиной 2000 футов. Я спросил, не проверял ли он работоспособность схемы при кабеле длиной 250 футов. Ответ был отрицательным, и я посоветовал ему проверить и такой вариант.

Через некоторое время он перезвонил мне и согласился с тем, что отражения в кабеле длиной 250 футов оказывались совершенно недопустимыми при отсутствии определенного выходного сопротивления у источника сигнала. Он сделал

неверное предположение о том, что наименее благоприятные условия возникают при подключении кабеля максимальной длины. В действительности же при максимальной длине кабеля типа RG174U с достаточно большим уровнем потерь максимальным было затухание сигнала, но именно благодаря затуханию у звона и отраженных сигналов была небольшая амплитуда. При подключении кабеля длиной 250 футов наименее благоприятные условия возникли в неожиданных местах.

Так что будьте внимательны при определении наименее благоприятных условий. Эффективность операционного усилителя можно свести на нет в том случае, когда выходное напряжение отличается от максимально допустимого положительного или отрицательного значения или тогда, когда уровень выходного напряжения либо тока отличается от нулевого. Наименее благоприятные условия для работы стабилизатора могут быть вовсе не при максимально допустимом для него нагрузочном токе. В случае, если источник питания для стабилизатора имеет чисто активное выходное сопротивление, рассеиваемая мощность при выходном токе в три четверти от номинального может оказаться больше, чем при номинальном.

Однажды я работал со стабилизатором, который отлично функционировал при температуре -55°C , при комнатной температуре и при $+125^{\circ}\text{C}$, но начинал барахлить при некоторых промежуточных значениях температуры. Поскольку некоторые инженеры уже провели испытания этих стабилизаторов при низких и высоких температурах и убедились, что при крайних температурах все работает так, как надо, мне пришлось здорово потрудиться для того, чтобы они отказались от поставок этих стабилизаторов потребителям.

Как-то раз один мой начальник спросил меня о том, насколько надежно защищены от короткого замыкания мои новые стабилизаторы. Я ответил, что они очень надежны, так как я проверял их, в течение нескольких дней и недель подвергая различным воздействиям — от коротких пачек до импульсов большой длительности. С кривой ухмылкой шеф подошел к инструментальному шкафу и извлек большой и тяжелый напильник¹. Он несколько раз перемкнул землю и выход моего стабилизатора, проводя этим ужасным инструментом по выходным шинам резкими скользящими движениями, извлек из стабилизатора снопы искр, но сжечь его не смог. «Оригинальный» тест, ничего не скажешь! Потом он объяснил мне, что если в случайном порядке несколько раз закорачивать напильником стабилизатор, то последний подвергается испытанию целой серией бросков тока нагрузки и температурных циклов, которые, в случае если система защиты стабилизатора от коротких замыканий недостаточно надежна, могут вывести его из строя. Существует масса примеров, чтобы показать, что та или иная конструкция будет работать в любых неблагоприятных условиях.

11.4. Импульсные стабилизаторы

Может ли знающий и опытный инженер разработать импульсный стабилизатор, который будет хорошо функционировать после незначительной доработки

¹ Это был драчевый напильник.

первоначальной конструкции и при серийном производстве которого удастся избежать масштабной разбраковки готовых изделий? Едва ли. Вероятность того, что конструкция, получившаяся у изредка занимающегося проектированием таких стабилизаторов инженера, сможет функционировать без доработок, очень мала, даже если этот специалист хорошо разрабатывает схемы другого назначения. Импульсный преобразователь – сложная система, состоящая из силовых транзисторов, трансформаторов, катушек индуктивности, одной или нескольких управляющих интегральных схем и большого количества пассивных элементов. Кроме того, критически важной является конструкция схемы: она должна быть спроектирована так, чтобы слабые сигналы были защищены от электростатических внешних и перекрестных наводок и, что еще важнее, чтобы в конструкции учитывались паразитные электромагнитные поля и нейтрализовывалось их воздействие. Я хочу сказать, что в эффективно работающем стабилизаторе скорости изменения напряжения и тока в вольтах и амперах за микросекунду очень большие, вот почему, чтобы в остальной части схемы навести шумы значительной амплитуды, вполне достаточно всего нескольких пикофарад или наногенри. Важную роль играет и топология силовых шин с токами большой величины, а еще более серьезными являются вопросы распределения потоков охлаждающего воздуха.

И когда кто-нибудь спрашивает меня о том, как построить импульсный стабилизатор, я уточняю: «А сколько устройств вы планируете изготовить?» Если отвечают, что потребуется всего несколько десятков и нужно получить полноценное устройство большой мощности, то я советую этому инженеру закупить уже готовую конструкцию. Однако, когда речь идет о больших партиях, то у инженера обычно есть время на то, чтобы надлежащим образом спроектировать устройство.

В качестве альтернативы собственной модели импульсного стабилизатора можно использовать одну из недавно появившихся интегральных микросхем простого, но полноценного импульсного стабилизатора.

Некоторые из этих схем – LM2575, LM2576, LM2577, LM2578 – предельно просты в обращении, насколько это вообще возможно для импульсных стабилизаторов напряжения. Вам понадобится пара резисторов, несколько конденсаторов, дроссель и быстродействующий выпрямительный диод. В результате прямо по справочнику вы построите настоящую рабочую схему. Я слышал, что информацию о необходимых типоминалах всех компонентов можно получить с помощью записанной на дискете программы, которая хорошо работает и удобна в обращении. Если для питания схемы вам вполне достаточно тока величиной всего несколько сотен миллиампер, то вы, вероятно, сможете обойтись без силового транзистора или радиатора.

Вот одна из историй, часто вспоминаемая среди тех, кто тесно связан с электронной промышленностью. Несколько инженеров решили объединиться и основать новую компанию по производству компьютеров. Наиболее подготовленному инженеру поручили разработку главной процессорной платы. Другой опытный специалист занимался разработкой всех интерфейсов. А подающему большие надежды молодому специалисту была поручена разработка импульсного источника питания – ведь это, несомненно, представляло собой самую простую часть задачи. (Здесь, наверное, каждый, кто сталкивался с разработкой больших импульсных

источников питания, выскажет диаметрально противоположную точку зрения: импульсный источник питания совсем не так прост, как может показаться.) В итоге создание источника питания продолжалось гораздо дольше, чем предполагалось.

В один неудачный день этот молодой инженер открыл отсек, где располагался «упрямый» источник питания, и прибор взорвался. После того как несчастного парня отвезли в больницу, товарищи по проекту посоветовались с коллегами и нашли инженера-консультанта, который зарабатывал на жизнь исправлением именно таких проблем в импульсных источниках питания. Данный источник был спроектирован не совсем правильно, и, для того чтобы он начал функционировать корректно, требовалось вмешательство эксперта. Так что никогда не забывайте: разработка импульсных источников питания – непростая задача. Не стесняйтесь попросить совета у эксперта. Учтите, что если история была бы не совсем правдивой, то этот инженер-консультант давным-давно умер бы с голоду.

11.5. Разные стабилизаторы

Существует несколько разновидностей импульсных стабилизаторов. При низком уровне мощности обычно используются очень простые емкостные импульсные преобразователи, которые обеспечивают небольшой выбор выходного напряжения: диапазон V_{out} практически ограничен значениями от $1,9 \times V_{in}$ до $-0,9 \times V_{in}$ или $0,45 \times V_{in}$. Самыми простыми и дешевыми стабилизаторами с магнитной связью являются стабилизированные обратные преобразователи. Однако при мощности порядка 100 Вт их недостатки проявляют себя в полной мере, и более подходящими для этих целей считаются прямые преобразователи или двухтактные схемы. При максимально высоких уровнях мощности лучше всего использовать мостовые или полумостовые схемы преобразователей. Если вы попытаете применить тот или иной стабилизатор при неподходящем уровне мощности, то вам, скорее всего, придется потратить немало времени, чтобы заставить его нормально работать. Кроме того, использование стабилизаторов, функционирующих в токовом режиме, поможет вам добиться более высокой скорости отработки ошибки в петле обратной связи, однако разобраться в принципах, на которых основан этот преобразователь, будет непросто. Но попытка – не пытка.

Ограничение выходного тока всегда вызывает проблемы при проектировании стабилизаторов. Подобрать резистор датчика тока непросто, так как он должен обладать небольшой паразитной индуктивностью. Для того чтобы добиться надежного функционирования и избежать неприятностей, связанных с ограничением тока нагрузки, вам придется потратить много времени на тщательное проектирование и тестирование этой схемы. Некоторые из новейших интегральных микросхем для управления стабилизированными импульсными преобразователями разработаны так, чтобы никаких сложностей не возникало. В старых моделях, например LM3524, ничего подобного предусмотрено не было.

Для мощных импульсных стабилизаторов важно использование схемы плавного запуска. Это в первую очередь относится к тем случаям, когда стабилизатор испытывает серьезные нагрузки, выдавая большой ток для того, чтобы быстро зарядить выходные фильтрующие конденсаторы, особенно в повышающих преобразователях,

где ток дросселя может достигать уровня насыщения и для обеспечения требуемой величины выходного напряжения может оказаться недостаточно энергии.

Если говорить о мощном источнике питания, то появление таких токов может повредить транзисторам, проводам, предохранителям, прерывателям, системам и сетям электроснабжения. Схема плавного запуска обеспечивает постепенное повышение выходного напряжения импульсного стабилизатора до его номинального уровня и ограничивает величину тока, потребляемого от сети электропитания. Я мог бы привести вам пример удачной конструкции схемы плавного пуска, но сделаю лучше – расскажу о неудачном варианте. В технических описаниях на LM3524 в качестве повышающего импульсного стабилизатора на напряжение 15 В и ток 0,5 А предлагается (то есть раньше предлагалось) устройство, схема которого показана на рис. 11.2. (Необходимо отметить, что эта схема и технические описания на LM3524 содержались в справочниках компании National Semiconductor, выпущенных в 1978, 1980 и 1982 годах. В выпуск 1986 года они не попали, а в 1989 году ошибка была исправлена.)

Для нормальной работы повышающего импульсного стабилизатора требуется, чтобы при запуске устройства трансформатор не насыщался и работа на этом не прерывалась. Исходя из этого, в схему, показанную на рис. 11.2, для обеспечения плавного пуска были добавлены конденсатор С1 и диод D1. Однако если в эту схему не добавить еще и резистор R1, и диод D2, то она по-прежнему будет работать плохо! Предположим, что стабилизатор функционирует при малой скважности и напряжение на выводе СОМР относительно низкое. Тогда, по мере изменения входного напряжения, может возникнуть необходимость резкого увеличения скважности. Однако при этом усилитель сигнала ошибки (рассогласования), напряжение с выхода которого выведено на вывод СОМР, не только должен будет работать на последовательную RC-цепь, подключенную к выводу СОМР, но и зарядить конденсатор С1 до нового уровня напряжения. Подобная нагрузка очень велика и непосильна для усилителя сигнала ошибки и вывода СОМР, вот почему выходной сигнал будет стабилизироваться слишком медленно. Проблемы можно избежать, добавив резистор сопротивлением 470 кОм между верхним выводом конденсатора С1 и источником входного напряжения. Этот резистор зарядит конденсатор С1 до более высокого уровня напряжения, в результате чего он не будет мешать работе после запуска и выхода на режим.

Даже после того, как мы добавим этот резистор, схема не будет работать должным образом. Серьезные проблемы возникнут в том случае, когда питание ненадолго пропадет или отключится. Для разряда конденсатора С1 емкостью 5 мкФ требуется много времени, и после непродолжительного отключения питания никакого плавного запуска не получится. Хорошим способом, позволяющим решить эту проблему, является установка параллельно вышеописанному резистору в 470 кОм диода, чтобы при падении уровня входного напряжения конденсатор С1 быстро разряжался. После этого у вас появится надежда на то, что при перезапуске выход на режим окажется плавным. Я не говорю, что конструкция схемы обеспечивает надежную работу при максимально неблагоприятных условиях, вам придется добиться этого в ходе ее проработки и приемочных испытаний. Однако схема не настолько плоха, как была изначально.

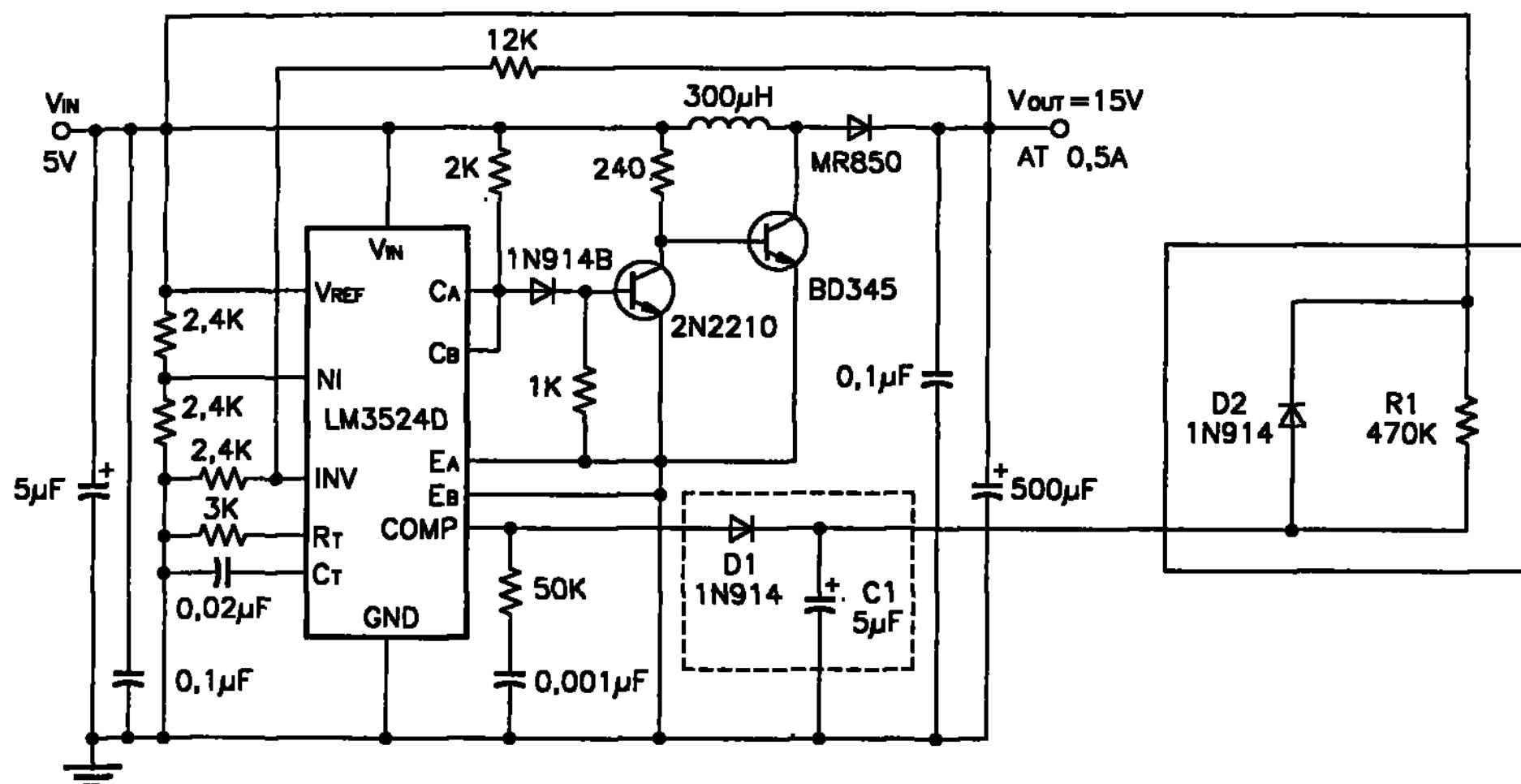


Рис. 11.2. Пример схемы стабилизатора из документации

Установка дополнительных элементов R1 и D2 в стандартную схему импульсного стабилизатора на 15 В и 0,5 А гарантирует более надежный плавный запуск и перезапуск схемы.

11.6. Об игрушках и о серьезном

Моя первая встреча со схемой плавного запуска состоялась, когда я был совсем маленьким. Это была старая игрушка в коробке с большим переключателем и надписью ВКЛ-ВЫКЛ на передней стенке. Когда я переводил переключатель в положение ВКЛ, то начинал жужжать моторчик, крышка коробки поднималась и из нее вылезала механическая рука, которая переводила переключатель в положение ВЫКЛ, а затем возвращалась в коробку. Крышка закрывалась, и жужжание стихало. Игрушка произвела на меня сильное впечатление, но позднее я понял, что эта «логическая последовательная схема» была иллюзией. Переключатель ВКЛ-ВЫКЛ действительно переключал какой-нибудь триггер, включавший питание механизма игрушки, но в выключении непосредственно не участвовал. Иначе механическая рука застыла бы сразу после того, как выключатель переводился бы в состояние ВЫКЛ, а не продолжала бы двигаться, убираясь внутрь коробки. Переключатель, выключающий игрушку, находился внутри коробки и приводился в действие завершающим движением руки.

Когда я работаю над АЦП, то добавляю в его схему устройство задания последовательности на регистре сдвига, который должен гарантировать, что все необходимые операции последовательно выполняются и в самом начале преобразования, и по его завершении. Я понятия не имею, как инженеры-программисты гарантируют в эффективных программах отсутствие ошибочных операций при запуске программы, но я готов поспорить, что не все делают это правильно.

Некоторые разработчики до сих пор используют для реализации функции СБРОС (RESET) микропроцессора настолько «дохлые» RC-цепочки, что процессор плохо на них реагирует или вообще не воспринимает и не может правильно

запуститься. Иногда разработчики забывают поставить диод для разряда конденсатора, а в таком случае перезапустить процессор после кратковременного пропадаания питания уже не удастся. (Этот диод выполняет ту же функцию, что и D2 в схеме на рис. 11.2.)

Разработчики используют схемы запуска также и в аналоговых схемах. К примеру, генераторы тока смещения строятся так, что всегда есть небольшой, но стабильный ток, от которого включается вся схема. После этого другой каскад (та самая «рука») отключает блок запуска. Если он работает как надо, то его использование позволяет экономить энергию, не занимая при этом большой площади на кристалле. К сожалению, если пусковая схема повреждена или не работает, то основная схема, вероятно, все же запустится при резком включении напряжения источника питания, но может не заработать при его плавном нарастании. Как-то раз клиент вернул стабилизатор и сообщил, что устройство начинало функционировать при нарастании напряжения источника питания до 20 В за 30 с или быстрее, но если этот процесс занимал 36 с и более, то стабилизатор совсем не запускался. Мы проверили и выяснили, что наш клиент был абсолютно прав. Для того чтобы предотвратить подобные проблемы в будущем, нам пришлось заметить один фотошаблон и дополнительно испытывать надежность запуска.

Более 20 лет назад один разработчик создал микромощную интегральную микросхему, в которой не было настоящей схемы запуска по постоянному току. Предполагалось, что эта микросхема будет запускаться за счет воздействия переходного процесса во время включения напряжения питания. При комнатной температуре эта схема всегда работала, независимо от того, насколько медленно нарастал уровень напряжения питания. Но при низких температурах не запускалась даже с напряжением питания ± 15 В, если оно нарастало медленно. И что еще хуже, если при работающем устройстве на одну из шин источника питания подавалась серия больших положительных или отрицательных импульсов, то прибор мог выключиться и никогда после этого не включиться. Вот почему данная микросхема не получила особого распространения, как, впрочем, и другие произведения этой фирмы. Так что разрешите предостеречь вас: чем бы ни была ваша схема – системой последовательной логики с обратной связью или же аналоговой схемой с петлями положительной и отрицательной обратной связи, – обязательно продумывайте схему начального запуска. Для того чтобы гарантировать, что неисправное изделие будет отбраковано, проводите повторные испытания. А в дополнение к этому соберите несколько образцов с поврежденной или отключенной схемой запуска и убедитесь, что они не выдерживают испытания.

Не пренебрегайте испытаниями в серийном производстве только потому, что никто и никогда не сталкивался с отказами выпускаемого устройства. Игнорирование подобных проверок обычно приводит к катастрофическим последствиям.

Литература

Dietz, Erroll H., "Reduce Noise in Voltage Regulators", *Electronic Design*, Dec. 14, 1989. с. 92.

12. ПРАКТИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ ИЗ ЗАГАШНИКА

Если в ходе поиска неисправностей обнаруживается какая-нибудь серьезная проблема, то полезно заранее определить, какие именно проверки или измерения позволят быстро ее решить. Перемежающиеся отказы – самая трудная и изматывающая задача. “FloobyDust” – это старое выражение, которое у нас в лаборатории означает «всякая всячина», «вместилище разнообразных предметов», «загашник» или «просто что-нибудь». В этой главе я объединил в категории “FloobyDust” ряд философских вопросов, в частности советы по планированию процесса поиска неисправностей и практические замечания по работе с компьютерами, инструментами и приборами.

12.1. Поиск неисправностей

Автомобиль, который не хочет ломаться, когда вы пригнали его в мастерскую, схема, которая никак не откажет, когда вы ее исследуете, но в 2 часа ночи отказывает, – вот проблемы, решение которых часто требует наивысшего напряжения сил.

Ниже перечислены приемы, с помощью которых можно исправить неполадки:

1. Попробуйте выявить связь (корреляцию) возникшей проблемы с чем-нибудь. Связана ли она со временем суток? С напряжением в сети? С фазой Луны? (Над этим смеяться не стоит.)
2. Привлеките сторонних наблюдателей, чтобы они помогли вам в поиске чего-нибудь еще, что может коррелировать с этим отказом. Люди помогут вам просто наблюдать, а дополнительное оборудование – проконтролировать большее количество каналов сбора и обработки информации.
3. Постарайтесь сделать так, чтобы произошло хоть что-нибудь. Подсказку может дать нагрев или охлаждение схемы. Если схему потрясти или подвергнуть механическим нагрузкам, то есть вероятность, что слабый или плохой контакт разомкнется окончательно, позволяя тем самым выявить и исправить возникшую неполадку. (Посмотрите комментарии к книге “Soul of a New Machine” в главе 5.)

4. Настройте запоминающий осциллограф или аналогичную систему сбора данных для контроля параметров работы и сохранения их значений в момент отказа. В зависимости от типа используемого прибора вы можете получить возможность сохранить данные, соответствующие либо состоянию системы в момент, *предшествующий* возникновению события, либо состоянию системы сразу *после* него, либо и то и другое одновременно.
5. Попросите друзей помочь в анализе возникшей ситуации. У них могут возникнуть свои идеи по поводу причины отказа, и они предложат план действий или новое испытание.
6. Так как проблема может оказаться очень сложной, аккумулируйте для ее решения все силы. Займите на время специальное оборудование. Сделайте дубликаты сбоящих схем или оборудования в надежде получить дополнительные примеры ошибок. В определенных случаях будет вполне допустимо слегка перегрузить оборудование для того, чтобы попытаться перевести перемежающийся отказ в постоянный, с которым часто проще справиться.

12.2. Программа SPICE

Я не являюсь горячим сторонником применения компьютеров и компьютерного моделирования в случаях, когда простые размышления не привели к определенным выводам. Иногда модель аналоговой схемы, построенная на компьютере, оказывается очень удачной, а если нет – то ситуация не из приятных. Частично это связано с тем, что некоторые инженеры излишне доверчиво относятся ко всему, что «скажет» компьютер, и считают это непоколебимой истиной. Наши начальники, к счастью, весьма скептические люди и считают, что мы должны быть очень внимательными в случаях, когда компьютер выдает неожиданные прогнозы. Тем не менее мы все согласны с мнением, что использование компьютеров дает определенные преимущества, но только в том случае, если мы можем преодолеть все связанные с их использованием неприятности и проблемы.

Очень часто, если в модели аналоговой схемы или системы обнаруживается отказ, то вы устраняете дефект точно так же, как делали бы это в обычной схеме. Вы строите карты напряжений при разных значениях «времени» и «температуры», используете различные управляющие воздействия, наблюдаете, чтобы определить, что происходит, производите модификацию и подстройку модели аналогично тому, как это делается при работе с реальными схемами. Однако вы можете, подобно «Братьям Марио в Компьютерленде», столкнуться с определенными трудностями:

1. Использовать схему, которая на самом деле является нерабочей.
2. Забыть задать компьютеру самый нужный вопрос.
3. Ошибиться при вводе значения или команды или чего-то в этом роде.

Самой простой ошибкой такого рода является попытка добавить в схему резистор сопротивлением 3,3 МОм (введя при этом значение 3,3 М). SPICE посчитает, что вы указали 3,3 миллиома, а не мегома. На этом попадались практически все, кого я знаю. Я научился избегать подобных ситуаций, вводя 3300 К (в SPICE это 3300 кОм) или же 3300111.

4. Использовать плохую «модель» для какого-нибудь транзистора или устройства. Я был свидетелем, как опечатка в описании модели транзистора на месяцы затормозила большой проект.
5. Не включать в модель паразитные составляющие, такие как емкость подложки, емкость печатной платы или – что чаще всего забывает большинство инженеров – индуктивность проводников и выводов.
6. Решение могло не «сойтись», или же было превышено ограничение на время выполнения программы, или же компьютер мог заартачиться из-за того, что в программе слишком много итераций.

Иногда возникают проблемы, решение которых по плечу только специалисту по вычислительным системам. Однако многие специалисты, отлично разбирающиеся в компьютерах, ничего не смыслят в линейных интегральных схемах. Предположим, что консультант говорит мне: «Да тут не о чем беспокоиться» или «Просто поменяй точность измерения напряжения с 0,1 на 10 мВ». В таком случае мне приходится объяснять ему, что результаты, полученные после внесения подобных изменений, оказались бы абсолютно бестолковыми. С компьютерными гениями иногда непросто разговаривать.

Даже если вы все делаете правильно, компьютер может выдавать неверные ответы. В таком случае необходимо провести тестирование, чтобы доказать, что вы способны получить правильный ответ, а компьютер – нет.

Приведу один пример. Как-то раз мы работали с моделью схемы, в которой использовали 60 транзисторов. При этом оказалось, что дифференциальный усилитель самовозбуждается, хотя он заперт. Специалисты-компьютерщики заявили нам об ошибке. Тогда мы отсоединили от схемы 58 транзисторов – остались

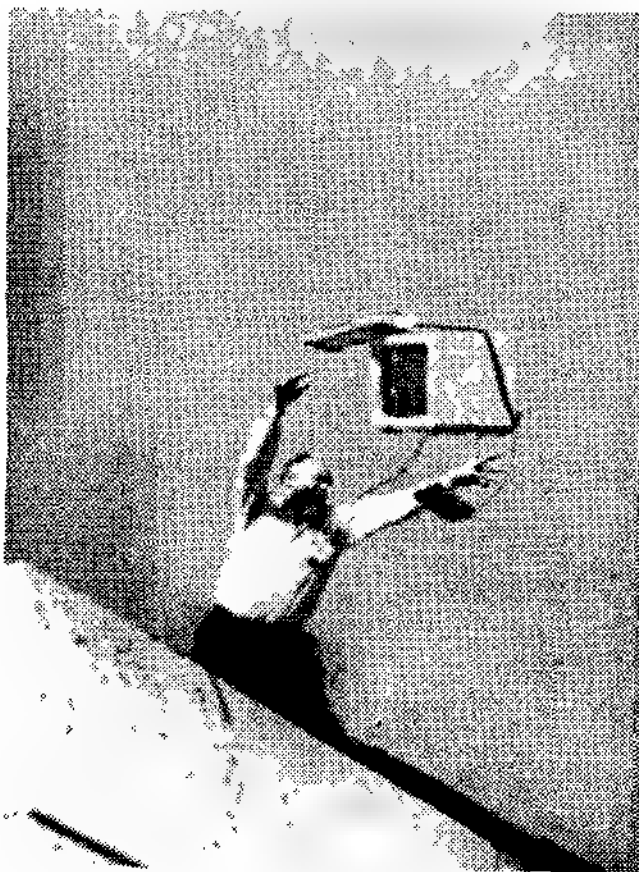


Рис. 12.1. Проклятие Пиза. Фотографии любезно предоставлены Элом Невесом (Al Neves) и Френом Хоффартом (Fran Hoffart)

Я выбросил компьютер с крыши трехэтажного гаража компании National. После того как осела пыль, я осознал, что этот компьютер уже никогда не будет меня обманывать!

только два, причем один из них был выключен обратным напряжением в целый вольт. Несмотря на то что в этой схеме ничего не происходило и не должно было происходить, коллекторный ток транзистора осциллировал с частотой 100 кГц между +10...–10 мкА. Когда мы сказали об этом компьютерным экспертам, они наконец признали, что в программе содержалась «внутренняя ошибка, связанная с обработкой времен», которую они впоследствии исправили.

Мой начальник считает, что мне не стоит так негативно относиться к компьютерам. Он говорит, что в будущем они будут играть важную роль в нашей жизни. Когда я слышу это, у меня возникает желание пойти и купить акции компаний, которые выпускают ExcedrinTM и антациды¹, так как и они в будущем сыграют не менее важную роль в нашей жизни...

На нескольких крупных конференциях я прочел лекции, в которых высказал свою точку зрения на программу SPICE и некоторые проблемы, возникающие при ее использовании [1, 2]. По окончании лекций ко мне подходили инженеры из других компаний и говорили: «Да, мы тоже сталкивались с похожими проблемами...» (Более подробно с комментариями по поводу SPICE можно ознакомиться в приложении G.)

Как-то раз один знакомый дал мне совет: «Не ставьте в свою схему резистор номиналом 50 Ом – используйте вместо него 50,1 Ом, тогда сходимость может быть лучше». В других случаях, как выяснялось, добиться схождения удавалось после добавления параллельной резисторно-емкостной цепочки, подключенной только к общему проводу. Причем после того, как резисторы и емкости этой цепочки попробовали «закомментировать», схождения добиться не удалось. Еще нам говорили, что сходимость может быть улучшена – либо нарушена – при смене имени резистора, или его порядкового номера, или его положения в перечне элементов.

Мой начальник советует мне не забывать о том, что в некоторых версиях программы SPICE сходимость лучше, чем в других, и мне не стоит заниматься критиканством. Но я всего лишь напоминаю вам: критике подвергаются все типы компьютерных моделей и иногда она бывает обоснованной – тот, кто жалуется, ничего не выдумывает [3].

И если компьютер постоянно выдает ложную информацию, то скажите своему боссу о «некомпетентности» программного обеспечения. Долой цифровые проблемогенераторы!!!

Создать модель на аналоговой (а не цифровой) вычислительной машине – вот именно то, что, как мне кажется, вы должны выполнить. В таком случае у вас будет гораздо меньше проблем. Обязательно увеличьте емкости транзисторов в 100 или 1000 раз от их реальных значений, и временная шкала будет в 100 раз больше, а побочные эффекты станут пренебрежимо малыми. Мне известны случаи, когда данная методика позволяла получить нужные результаты, а система SPICE – нет. Эту программу можно было бы назвать «аналоговым компьютером» – ведь так оно на самом деле и есть. Тем не менее я готов выслушать (правда, с определенной долей скептицизма) альтернативные точки зрения.

¹ Лекарства от повышенной кислотности. – Прим. переводчика.



Рис. 12.2. Распечаткам результатов программы SPICE всегда можно найти достойное применение

12.3. Результаты статистических анализов

На мой взгляд, результаты статистических анализов не просто бесполезны, а вредны. Графики и диаграммы – вот что мне *действительно* нравится. Если вернуться к главе 6, то данные об отношении V_F к I_F диода, записанные в виде цифр, выглядели слегка подозрительно. Но после того, как я построил график, то *отчетливо увидел*, что здесь что-то не так. Затем я вернулся к схеме и продолжил сбор данных, пока не понял, в чем заключалась ошибка: в ход моего эксперимента вмешались составляющая наводки по переменному току, которая выпрямлялась. Когда данные получены от удобного для изучения явления и хорошо согласуются с распределением Гаусса, то я не возражаю, если кто-нибудь воспользуется результатами статистического анализа – есть надежда, что *сильного* вреда это не принесет. Тем не менее, когда данные вызывают подозрение, классический статистический анализ абсолютно бесполезен.

Приведу пример. Однажды инженер по испытаниям принес мне большой формальный отчет, который выглядел профессионально и неотразимо. Для того чтобы показать, что интегральная схема далека от совершенства, а система тестирования и программное обеспечение просто великолепны, инженер, проводивший тестирование, использовал различные статистические методы. На последней странице отчета он заявил, что в соответствии с результатами статистического анализа выходной сигнал имел абсолютно неверные, не соответствующие техническим

условиям параметры, следовательно, данная интегральная схема к передаче в производство не готова. Из результатов его наблюдений фактически следовало, что средний уровень выходного сигнала был равен 9 В – полный абсурд для контроллера импульсных стабилизаторов типа LM1525, сигнал на управляющем выходе которого может принимать всего два значения: 0,2 В для НИЗКОГО уровня и 18,4 В для ВЫСОКОГО. Как же получился средний выходной сигнал, равный 9 В? И можно ли сделать так, чтобы выходной сигнал RS-триггера завис посередине между напряжением питания и землей? Невероятно... Затем он обратил наше внимание на другие статистические результаты: область 3σ для выходных напряжений была между +30...–8 В. Но ведь подобные характеристики выглядят очень странно для схемы, которая подключена только к напряжению питания +20 В и к земле (и при этом не работает в качестве импульсного стабилизатора – у схемы просто проверяются параметры на постоянном токе). Сопровождение по передаче продукции в производство прервалось до того, как я собрал факты и подготовил протест, так что вовремя этот отчет забраковали.

Потом, конечно, выяснилось, что испытания проводились неправильно. Когда на интегральной схеме должен был быть УСТАНОВЛЕН выходной сигнал +18,4 В, она на самом деле находилась в неопределенном состоянии, вот почему в половине случаев выходной сигнал равнялся 18,4 В, а в половине – 0,2 В. Если ввести эти данные в программу статистической обработки, то, допустив, что они подчиняются распределению Гаусса, вы и впрямь могли бы получить сообщение о том, что выходной сигнал имеет значение 9 В. Но если *посмотреть* на эти данные и *подумать*, выяснится, что съём информации производился в нештатной ситуации.

К несчастью, этот инженер был настолько уверен в своей статистической программе, что всю неделю занимался исключительно подготовкой отчета. Он даже не сказал инженеру-разработчику о проблеме в работе интегральной схемы, не проверил полученную информацию и оборудование, на котором проводилось испытание, а продолжал создавать отчет, зная, что компьютерный анализ важнее всего остального.

В конце концов мы все-таки добились того, что ошибки, допущенные при тестировании, были исправлены, и чуть позже устройство было запущено в производство. Но, как ни удивительно, я не очень хорошо относился к этому инженеру по испытаниям (а заодно и к его статистике) все то время, пока он работал в нашей компании.

Этим примером я предостерегаю всех тех, кто пытается использовать методы математической статистики там, где этого делать нельзя.

Мне очень нравится строить двумерные графики дисперсии – они помогают определять тенденции происходящего и выискивать «мутации», которые выбиваются из общего ряда. Меня не интересует большой объем данных, полученных от исправных устройств или кристаллов из удачных запусков в серию, – я изучаю результаты измерений неисправных модулей и дефектных запусков, а также поддерживаю и поощряю применение программ, помогающих обрабатывать графики. Я за то, чтобы пользоваться такими программами, *проверять* полученные результаты и *обдумывать* эти данные.

12.4. Держи ноги в тепле, а голову (и приборы) на холоде...

Несколько лет назад ко мне обратился инженер, пытавшийся применить один из выпускаемых нашей компанией неплохих источников опорного напряжения, типичная характеристика долговременной стабильности которого составляла порядка 20 млн^{-1} за 1000 часов наработки при температуре $+125^\circ\text{C}$. Устройство должно было функционировать при температуре, близкой к комнатной. Этот инженер сильно рассердился из-за того, что дрейф, по его расчетам, должен был составлять порядка $0,1 \text{ млн}^{-1}$ за 1000 часов наработки, но в действительности дела обстояли гораздо хуже. Он хотел знать, почему же выпускаемый нашей компанией источник опорного напряжения не проявил себя должным образом. Я объяснил ему, что у усилителей и источников опорного напряжения дрейф *не уменьшается* в два раза тогда, когда его температура понижается на 11 градусов. При дополнительном охлаждении современных радиодеталей или отсутствии нагрева их характеристики не сильно улучшаются. Те из нас, кто помнит вакуумные лампы, знают, что на самом деле качество работы хороших осциллографов или вольтметров повышалось при постоянной работе в «разогретом» состоянии, так как все их компоненты оставались сухими и никогда не отсыревали в условиях повышенной влажности.

Я хочу сказать, что бессмысленно пытаться повысить надежность системы, прилагая чрезмерные усилия для поддержания максимально низкой температуры ее компонентов, и считаю, что многие положения технических требований MIL-HBDK-217 и их вариантов не выдерживают критики в этом отношении. Чарльз Леонард (Charles Leonard) из компании «Боинг» – один из тех, кто активно участвует в спорах по поводу технических требований 217, и вы можете получить настоящее удовольствие, ознакомившись с его статьей [4]. Так что если у какого-нибудь устройства наблюдается небольшой дрейф характеристик, то я хочу вас заранее предупредить: установив вентилятор и сбив температуру с $+75$ до $+55^\circ\text{C}$, вы, вероятно, будете разочарованы, так как обычно значительного улучшения не происходит. Если ваша схема плохо спроектирована с точки зрения пригодности к термическим перегрузкам и циклам и это вызывает образование большого числа зон резкого перепада температур и приводит к плохой конвекции, то вам, возможно, удастся минимизировать связанные с перегревом проблемы, но большого эффекта не получится (при условии, конечно, что температура компонентов не подходит вплотную к максимально допустимым значениям или не превышает $+100^\circ\text{C}$). При 100°C даже пластмассовые радиодетали могут работать надежно. То есть именно те детали, которые мне очень хорошо знакомы.

12.5. Стрелочные приборы

Все знают, что аналоговые измерительные приборы не так точны, как цифровые. Однако... можно купить цифровой вольтметр с точностью измерения $0,8\%$ и существуют аналоговые измерительные приборы с еще большей точностью.

Как бы то ни было, давайте поподробнее рассмотрим ряд проблем, связанных с использованием аналоговых измерительных приборов.

Даже в том случае, когда шкала аналогового измерительного прибора точно откалибрована на всей ее протяженности, при измерении слабых сигналов прибор может работать с меньшей точностью, что вызывается погрешностями, существующими магнитным «цепям» прибора. От этой проблемы можно избавиться, отградуировав собственную шкалу, учитывающую нелинейные отклонения. Кроме того, существуют сложные моменты, связанные с трением и гистерезисом. В наиболее качественных моделях измерительных приборов используется нить для «растяжки», обеспечивающая минимальное трение, но в большинстве дешевых приборах она отсутствует. Теперь, когда мы узнали необходимую информацию, можно, легонько пощелкивая по стеклу, слегка постукивая по корпусу или аккуратно встряхивая прибор, нейтрализовать большую часть вызываемых трением искажений. Эти постукивания и потряхивания сильно раздражают, но, когда у вас не окажется другого выхода, вполне допустимы.

Даже если вы свои приборы не трясете, не стучите по ним и не крутите их вокруг оси, то должны знать, что показанные результаты зависят от положения прибора в пространстве. Устройство, установленное на плоскости, поставленное вертикально или перевернутое на бок, может в каждом случае показывать разные значения. Самым плохим показателем аналоговых измерителей является то, что, если вы уроните такой прибор, любой из его недостатков может в значительной степени усиливаться, вплоть до того, что он выйдет из строя или станет практически непригодным для использования. Это и есть «позиционная чувствительность», возведенная в крайнюю степень. Лучше всего в любых ситуациях использовать цифровые измерительные приборы. Но применение аналоговых приборов дает определенные преимущества в ситуации, когда, например, вам надо определить тенденцию изменений, посмотреть на производную или выявить кратковременный выброс амплитуды. Особенно эти преимущества проявляются при наличии в исследуемом сигнале шумов, которые могут сделать неразборчивыми показания цифрового вольтметра. Так что аналоговые приборы долго будут служить нам, учитывая то, что они изолированы, дешево стоят и им не нужны дополнительные источники питания.

Однако не следует забывать о сопротивлении, возникающем при движениях стрелки измерителя. На высоких частотах оно напоминает сопротивление электромотора с заторможенным ротором – несколько сотен миллигенри. Но, если стрелка начнет колебаться, произойдет резкий рост индуктивности, до величины во много генри. Так что если вы подключаете стрелочный измерительный прибор в цепь обратной связи операционного усилителя, то установите параллельно этому прибору шунтирующий конденсатор средней емкости.

12.6. Цифровые приборы

Как я уже упоминал, цифровые измерительные приборы всегда точнее аналоговых... за исключением тех случаев, когда это не так. Недавно одна из фирм-производителей источников питания решила модернизировать свои настольные устройства, заменив старые стрелочные измерительные приборы цифровыми. К сожалению,

последние имели класс точности $\pm 5\%$. Не вызывает сомнения, что использовать цифровой щитовой измерительный прибор, имеющий два с половиной разряда и разрешение в одну двухсотую полной шкалы, но позволяющий проводить измерения с точностью до одной двадцатой, глупо. Нечего и говорить, что я отказался от закупок источников питания у этой компании.

Психологически трудно противостоять стабильности и неоспоримости ярко светящихся четких цифр. Я отношу результаты, полученные с помощью цифрового вольтметра или цифрового щитового измерительного прибора, к тому же классу, что и выходные значения любого компьютерного оборудования: нужно научиться верить компьютеру или прибору тогда, когда он сообщает вам истину, а вот когда он начинает выдавать что-то отличное от истины, немедленно отключать его.

К примеру, в большинстве медленных щитовых цифровых измерительных приборов используются принципы вроде двукратного интегрирования или интегрирующего преобразования, так что устройствам присуща практически абсолютная линейность, возможно, в пределах одной или двух последних значащих цифр. К преимуществам других щитовых цифровых измерительных приборов относят более высокую скорость преобразования, которая, вероятно, никогда не понадобится инженеру, работающему на стенде, однако наверняка пригодится, если этот прибор войдет в состав автоматизированной системы сбора и обработки данных. В качестве схем преобразования обычно используются схемы последовательного приближения (или recirculating-remainder). Им несвойственна существенная линейность, они, как и другие параметры, зависят от тщательности настройки и используемых компонентов. Мне встречались модели щитовых цифровых измерителей, которые стоили больше \$1000 и «предвзято относились» к некоторым отдельным значениям измерений. Один из приборов не преобразовывал величину 15 мВ, а предпочитал показывать 14 или 16.

Как-то раз мне позвонил инженер, работающий в одной из самых больших компаний по производству оборудования. Он не мог понять, почему преобразователь напряжения в частоту, который он построил на LM331 производства компании National Semiconductor, обладал плохой линейностью – хуже, чем гарантированные в технических описаниях 0,01%. Я сказал ему, что это действительно странно, так как (если он не ошибся) ему попался первый LM331 с неудовлетворительной линейностью из всех выпущенных к тому времени двух миллионов интегральных микросхем.

Я посоветовал инженеру проверить конденсаторы и формы сигналов внутреннего операционного усилителя, после чего перезвонить мне, так как, если ему попала микросхема, не соответствующая техническим условиям, мне было необходимо получить ее в свое распоряжение.

На следующий день он сообщил, что в качестве образца был использован прототип разработанного у них в компании цифрового вольтметра и его калибровка не проходила строгого контроля. Линейность была нарушена не у LM331, а именно у этого вольтметра.

Обычно при работе с цифровыми вольтметрами я предпочитаю не использовать режим автоматического выбора предела измерений. Мне встретились как

минимум два цифровых вольтметра (в остальном – высококачественных), у которых отсутствовала возможность блокировки этого режима. Хуже всего, что при работе с ними я не мог точно сказать, когда они будут автоматически переходить с одного предела измерений на другой, и определить, где искать нелинейность. После нескольких часов поиска я нашел пару пропущенных кодов при довольно непростом значении напряжения, равном 10,18577 В. И это у цифрового вольтметра стоимостью \$4000, который, по утверждению производителя, просто не мог обладать нелинейностью, превышающей 1 млн^{-1} !

Другой цифровой вольтметр отображал величину собственной гарантированной максимальной ошибки. Из показаний прибора следовало, что при измерении резистора сопротивлением 1 МОм собственная ошибка не должна была превышать $\pm 0,004\%$. Затем он стал показывать, что сопротивление одного из моих самых качественных резисторов номиналом 1,000000 МОм на самом деле равно 0,99980 МОм. Как же я мог проверить, не врет ли он? Очень просто – я обратил силу этого прибора против него самого, взяв 10 резисторов, сопротивление каждого из которых составляло в точности 100,000 кОм (при измерениях этот прибор и все остальные цифровые вольтметры, имевшиеся в нашей лаборатории, согласованно и единодушно показывали именно это значение), и соединив их последовательно. Все прочие измерительные приборы показали, что сопротивление цепи возросло до 1,000000 МОм, а этот вольтметр снова выдал 0,99980 МОм.

Так что, если у вас возникли противоречия с цифровым измерительным прибором, не стоит думать, что ошибаетесь обязательно вы.

Чаще всего с помощью другого прибора вы сможете получить оценку, позволяющую определить истину. Нельзя автоматически считать, что данные *должны* быть истинными *только* потому, что они цифровые.

И обязательно следуйте инструкциям, содержащимся в поставляемом вместе с прибором руководстве по эксплуатации. Из этого руководства вы сможете узнать, при каких параметрах сигнала величина гарантируемой ошибки становится относительно большой: при очень малых сопротивлениях, при слишком высоких сопротивлениях, при малом напряжении переменного тока или на очень низких или очень высоких частотах...

У большинства цифровых вольтметров очень высокое входное сопротивление (обычно 10000 МОм) при малом уровне измеряемого сигнала. Однако если вы позволите цифровому вольтметру автоматически определять предел измерений, то при некоторых уровнях входного сигнала прибор автоматически переключится на более высокий предел, при котором входное сопротивление станет равно 10 МОм. У отдельных цифровых вольтметров переключение пределов происходит при напряжении ± 2 или 3 В, у других – при 10, 12 или 15 В, а у остальных – даже при ± 20 В. Как я уже упоминал в главе, посвященной оборудованию, мне нравится работать с цифровыми вольтметрами, у которых высокий уровень входного сопротивления сохраняется как минимум до тех пор, пока напряжение входного сигнала не достигнет 15 В. Однако очень важно точно знать, при каком напряжении меняется входное сопротивление. Недавно мой приятель рассказал мне, что один из техников целую неделю записывал данные, которые потом пришлось переснимать заново, так как на изменение входного сопротивления внимания никто

не обратил. Я думаю, что стоит пройтись по лаборатории и наклеить на все цифровые вольтметры соответствующие этикетки.

Несмотря на все вышесказанное, цифровые вольтметры – очень мощные и полезные приборы, часто обладающие исключительной точностью и потрясающими линейностью и разрешающей способностью – вплоть до 1 млн^{-1} . В течение долгих лет я мог положиться на некоторые из этих прецизионных приборов с суперлинейными характеристиками, как на своих верных друзей. Мне действительно нравятся некоторые приборы, такие как HP3455, HP3456 и HP3457, обладающие постоянной линейностью и относящиеся к высшему классу.

Отметим одну маленькую, но очень важную деталь: даже для самых высококачественных цифровых вольтметров справедливо замечание «тепло – враг точности». У некоторых «цифровиков», например, наблюдается несколько лишних микровольт теплового дрейфа, но только в том случае, если вы поставите прибор на бок или «на попа». У других – тепловые колебания, отклонения или погрешности величиной в несколько микровольт при подаче на них нулевого сигнала (если замкнуты щупы), но только в том случае, если используются обычные штекеры, или штекеры с подпружиненными контактами, или толстые провода (16-го, 18-го или 20-го калибра). Если используются тонкие провода (26-го или 28-го калибра), то этого не происходит.

Очевидно, что тонкие провода не отводят много тепла с резьбовых клемм на передней панели. Так что цифровые вольтметры, использующие даже самые высококачественные и прецизионные схемы автоматической установки нуля, не могут скорректировать дрейф, который вызывается причинами, находящимися вне области действия устройств.

Большинству инженеров известно, что подключение цифрового вольтметра к любой цепи способствует появлению дополнительной резистивной (10 МОм) и емкостной составляющих (от 50 до 1000 пФ) и может привести к возникновению самовозбуждения. Практически не известно то, что даже самые высококачественные цифровые приборы могут генерировать шум, который потом через их входные цепи и клеммы способен распространиться в виде слабого «цифрового шума» по всей вашей лаборатории. Вот почему, если вы будете работать с чувствительной схемой и создастся впечатление, что в ней возникает большое количество шумов, то выключите на несколько секунд цифровой вольтметр. Это позволит вам проверить, не является ли он источником шумов. Если окажется, что прибор тут ни при чем, выключите генератор функций или паяльник. Если же источником помех окажется именно вольтметр, то для понижения уровня шумов, попадающих в вашу схему, вам, скорее всего, понадобятся RC-фильтры, RCL-фильтры или активные фильтры/буферы с прецизионными операционными усилителями. В главе 2 на рис. 2.4 приведена схема небольшого RC-фильтра, посредством которого можно предотвратить проникновение шумов из вольтметра в схему. Вместо этого можно было бы использовать аналоговый прибор, который, как я уже рассказывал, не самовозбуждается или не генерирует шумы. По сравнению с цифровым вольтметром, аналоговый измерительный прибор с предусилителем, работающий от автономного источника питания (на батарейках), вообще не создает сколько-нибудь заметных шумов...

12.7. Источники сигналов

Коль скоро мы затронули тему приборов, скажу сразу, что на самом деле нет ничего лучше высококачественного прецизионного функционального генератора для получения синусоидальных, треугольных и прямоугольных сигналов и импульсов. Мне очень нравится мой старенький Wavetek 191. Но я вовсе не ожидаю, что производимые им сигналы не подвергнутся никаким искажениям – все переменные напряжения слегка искажаются, особенно на высоких частотах. Так что если мне нужно получить от функционального генератора четкий синусоидальный сигнал, то при низких частотах я пропускаю его выходное напряжение через активный фильтр, а при высоких частотах – через LC-фильтр. Когда мне нужен «красивый», четко очерченный прямоугольный сигнал, то я пропущу сигнал с соответствующего выхода генератора через усилитель-ограничитель или через ограничитель-аттенюатор на диодном мосте (рис. 12.3). Если мне нужен более четкий треугольный сигнал, чем выдает мой функциональный генератор, то я просто собираю новый генератор треугольных сигналов.

Однако я полностью разочаровываюсь в функциональном генераторе, если какой-нибудь рассеянный трудяга много раз нажмет на кнопки и генерация выходного сигнала прекратится. (Обычно этим рассеянным трудягой оказываюсь я сам.) Для того чтобы разобраться в случившемся, мне может понадобиться целых пять минут. Я восхищаюсь всеми этими мощными, гибко настраиваемыми функциональными возможностями, когда они мне нужны, но если нажата не та кнопка, то можно сойти с ума, разбираясь с настройкой прибора.

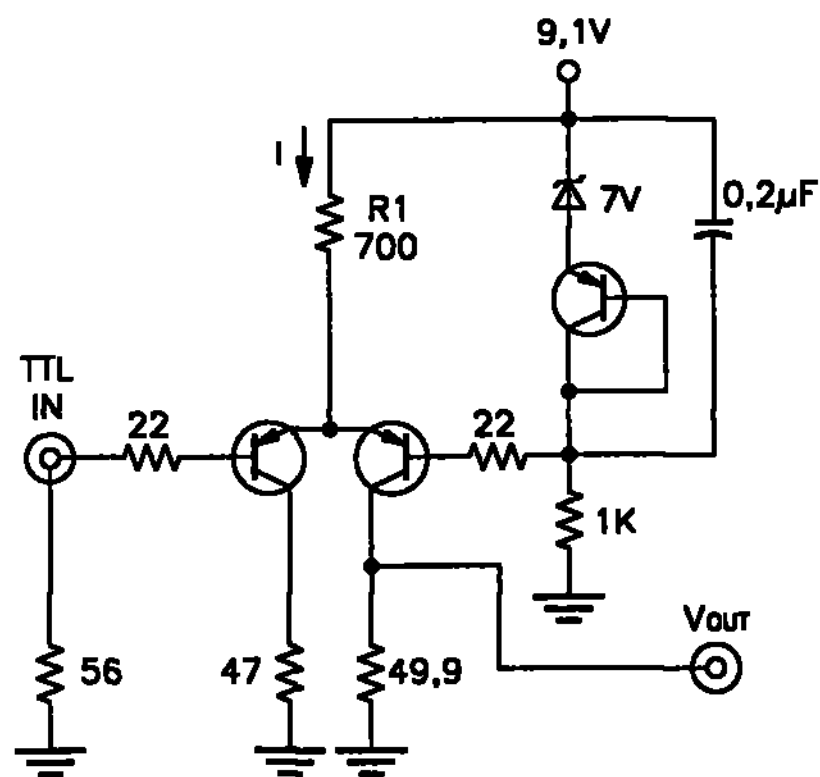
Аналогичным образом с экрана осциллографа может исчезнуть изображение и «спрятаться» в углу или на краю экрана до тех пор, пока вы не разберетесь, что кто-то (или что-то, возможно, ваш собственный палец) нажал на «вредную» кнопку.

Однако следует отметить, что современные осциллографы работают очень хорошо. Только не надо рассчитывать на прецизионный результат после того, как вы, повышая коэффициент усиления, на несколько сантиметров поднимете осциллограмму относительно центральной шкалы для того, чтобы посмотреть на нижнюю часть прямоугольного сигнала большой амплитуды. С помощью большинства осциллографов нельзя качественно выполнить подобную операцию. Кроме того, тщательно настраивайте корректирующие конденсаторы на щупах 1:10 и, как было сказано во главе 2, используйте короткие выводы заземления при наблюдении высокочастотных или коротких сигналов.

12.8. Не откладывайте на завтра то, что можно исправить сегодня

Некоторые инженеры любят сначала собрать большую систему, а потом включить питание. И совсем не факт, что она заработает.

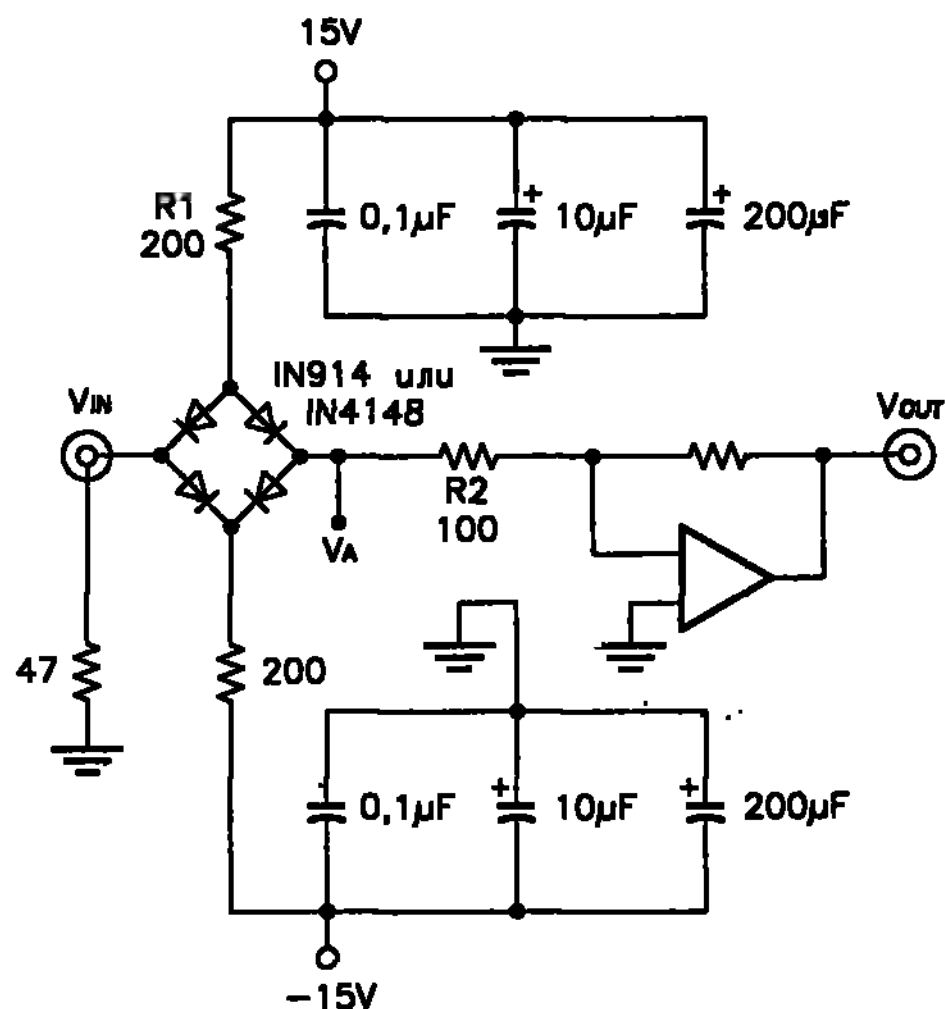
Я предпочитаю собирать отдельные модульные фрагменты и тестировать каждый модуль сразу, как только он будет готов. При таком подходе, если блок работает, это даст мне приятный положительный импульс. Причем в течение работы над проектом это произойдет несколько раз. Однако, если модуль не работает,



Все транзисторы типа 2N3906

$$V_{out} = I \times 50\Omega = \frac{7V}{R_1} \times 50\Omega$$

a)



$$V_A = (15V - 0.7V) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

b)

Рис. 12.3. Прецизионные формирователи импульсов

Чистый и четкий прямоугольный сигнал можно получить с помощью усилителя-ограничителя (a) либо ограничителя на диодном мосте (b).

у меня будет шанс выявить проблему до того, как я соберу все устройство. Иногда причиной бед может оказаться неподходящий конденсатор. В других случаях неверной может оказаться вся концепция, и чем раньше я обнаружу такую ошибку, тем лучше. Поэтому не удивляйтесь, если увидите, что какая-нибудь система, сделанная мной, состоит из 14 маленьких 7-дюймовых квадратных секций, а все связи между ними расположены на основной плате. Я хочу сказать, что если *вы* способны спроектировать большую систему так, чтобы она с первого раза заработала, то это говорит о вашем профессионализме. Я часто напоминаю своему технику: «Эта схема может сразу не заработать, но она будет *практически завершена*. Вам, вероятно, придется подкорректировать резистор здесь или конденсатор там, но ничего страшного не предвидится».

Когда мне попадается схема, которая функционирует не так, как должна, то хочу ли я просто исправить положение? Вовсе нет. Я попытаюсь разобраться, что же в этой схеме не так, и понять происходящее при внесении изменений. Так что я сначала прошу своего техника изменить что-то одно и посмотреть, не улучшилось ли усиление. Если это не помогло, то опять прошу сделать то-то и то-то и не прекращать контролировать усиление и фазу. Затем предлагаю слегка изменить такой-то элемент выходного каскада и настроить его так, чтобы при частоте 10 кГц искажения получились меньше... Если мы не узнаем, что именно нужно было изменить, то ничему не научимся, не так ли?

12.9. Системы и схемы

В ходе создания системы ее обычно разбивают на отдельные части или блоки, работа над которыми поручается разным сотрудникам или группам инженеров. Очень важными слагаемыми успешной разработки такой системы являются планирование и обмен информацией. Если разбиение на части или блоки проведено неверно или неаккуратно, то может получиться так, что создавать одни модули будет слишком просто, а остальные – практически невозможно. Мы все сталкивались с аналогичными ситуациями, так что должны быть особенно осторожными и не допустить повторения подобного при разработке *своих* систем. Ведь если из всех модулей не будет работать хотя бы *один*, то, вероятнее всего, неудача постигнет проект в целом.

Существенно важной является потребность в надежном обмене информацией. Необходимо организовать эффективное устное и письменное общение, что позволит избежать путаницы и ложных предположений. В конце концов не стоит надеяться, что конструкция системы в целом и каждая из составляющих ее частей или блоков с самого начала окажутся идеальными. Отвечать за работоспособность системы должен один человек – менеджер проекта. У него в распоряжении будут компьютеры, графики системы ПЕРТ¹, графики Ганта, но самое главное – люди, которые должны быть осведомлены о признаках возникновения неприятностей, чтобы вовремя сообщить о проблемах руководителю проекта и принять меры по исправлению ситуации.

12.10. Настройка аналоговых схем

Некоторые инженеры предпочитают использовать подстроечные резисторы для того, чтобы очень точно выставлять параметры схем. Другие не любят этого, так как потенциометры или подстроечники либо стоят дорого, либо ненадежны и нестабильны в работе. Хуже всего то, что, если схему можно настроить, значит, ее можно настроить неправильно. Вполне вероятна такая ситуация, когда кто-нибудь по невнимательности или по ошибке вывернет потенциометр в одно из крайних положений или же выставит с его помощью неверное значение. И сколько пройдет времени, прежде чем ошибка будет исправлена?

Именно по этой причине некоторые инженеры предпочитают использовать стабилизаторы с фиксированным выходным напряжением, так как у них постоянно поддерживается заданный уровень выходного напряжения (с отклонением $\pm 5\%$) и ни один подстроечный резистор не может оказать никакого влияния на выходной уровень напряжения. Но есть и другие специалисты, которым требуется более точное соответствие выходного напряжения заданному уровню, а применять подстроечные резисторы они опасаются. В таком случае разрешается воспользоваться показанной на рис. 12.4 схемой, которая позволяет «нарезать» необходимое напряжение [5]. Посредством этой схемы вы без подстроечных резисторов или потенциометров

¹ Система планирования и руководства программами разработок. – Прим. переводчика.

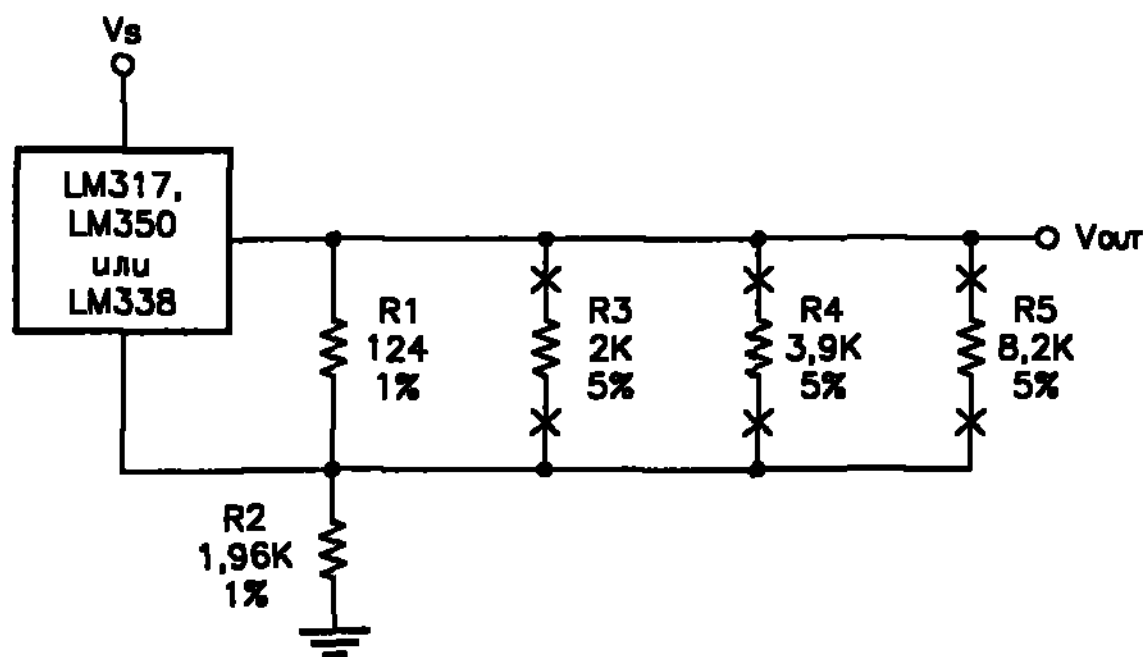


Рис. 12.4. Регулировка без потенциометров

Если вы боитесь, что какой-нибудь неаккуратный сотрудник спалит схему, неправильно выставив подстроечный резистор, то можете защититься от этого с помощью представленной на рисунке схемы, позволяющей «нарезать» нужное выходное напряжение. Процедура настройки V_{out} до уровня 22 В при допустимом отклонении 1% следующая:

- если V_{out} выше 23,080 В, отрежьте R_3 (в противном случае оставьте резистор на месте);
- если V_{out} выше 22,470 В, отрежьте R_4 (в противном случае оставьте резистор на месте);
- если V_{out} выше 22,160 В, отрежьте R_5 (в противном случае оставьте резистор на месте).

Эту схему, очевидно, можно адаптировать для любого выходного напряжения. Подбор точек разреза и номиналов резисторов представляет собой не очень сложную задачу.

сможете выставить выходное напряжение с погрешностью, не превышающей 1% от заданного значения. Обратите внимание на то, что подобную схему допускается использовать и для подстройки коэффициента передачи интеграторов или коррекции смещения нуля усилителей. Подобрать подходящие параметры элементов подобной цепи подстройки можно, хотя и не всегда просто. Если потенциометр, который допускается крутить, отсутствует, то уже никто не собьет его настройку.

К наиболее волнующим меня аспектам разработки аналоговых схем относится использование слишком широких диапазонов изменения параметров, что иногда приводит к повреждению схем в процессе настройки. На рис. 12.5а приведен пример неудачно разработанной принципиальной схемы стабилизатора напряжения 5 В для питания логических схем – микросхемы ТТЛ будут повреждены, если кто-нибудь выкрутит потенциометр в одно из крайних положений. На рис. 12.5b – вполне приемлемый вариант такого стабилизатора.

12.11. Макетные платы без пайки

В этом разделе речь пойдет о тех самых беспаячных макетных платах, которые состоят из большого количества металлических полос и не требуют пайки соединительных

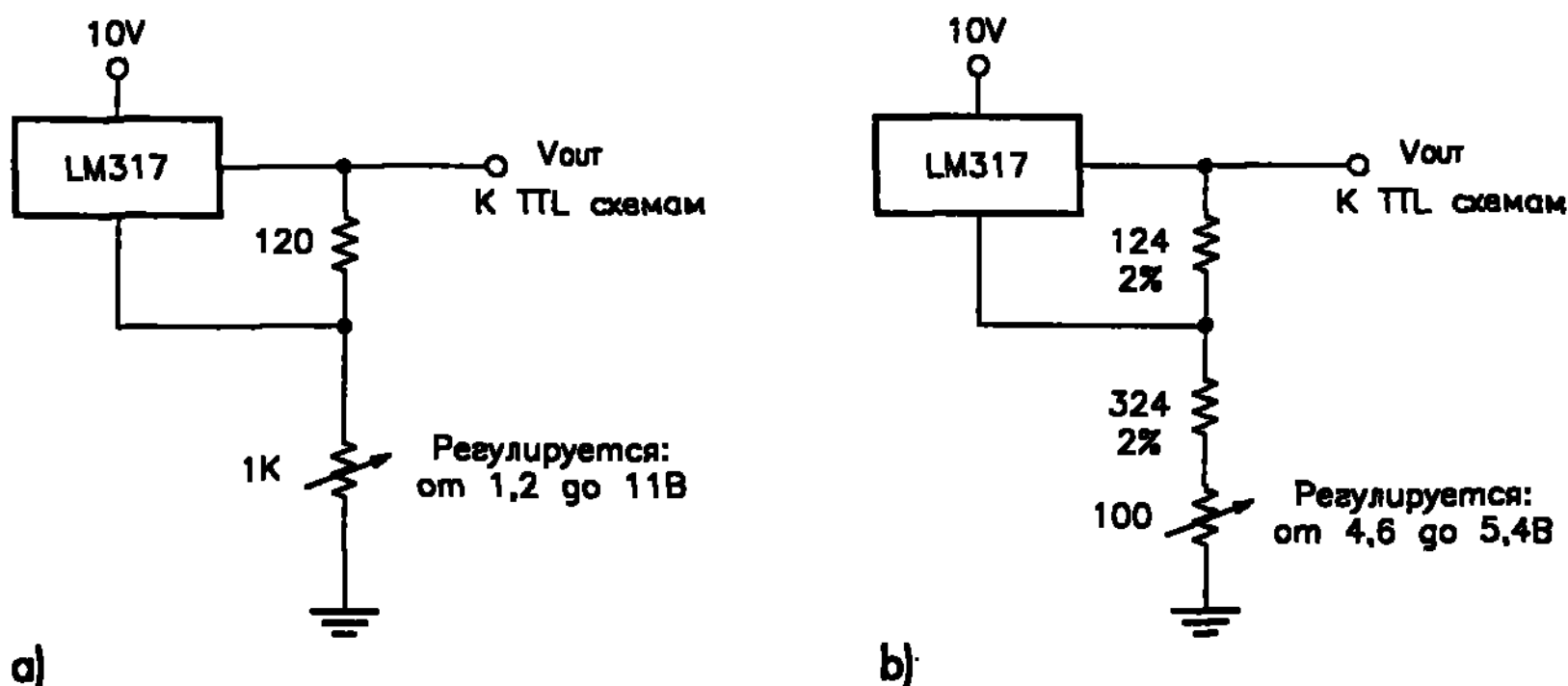


Рис. 12.5. Выбор пределов регулировки

Слишком большой диапазон изменений при вращении подстроечного резистора (а). Схема, показанная на рисунке (б), позволяет гораздо точнее подстроиться под потребности ТЛ схемы.

гнезд, спрятанных под пластмассовой пластиной с огромным количеством отверстий. Такие платы часто используются в школах для того, чтобы познакомить учащихся с прелестями макетирования, так как элементы плат можно очень легко соединять друг с другом, втыкая в отверстия провода и выводы элементов. Первые неприятности возникают с емкостями. Соседние металлические шины на макетных платах обычно обладают емкостью 2, 3 или 5 пФ. В удачный день только очень грамотный инженер смог бы спроектировать такую топологию, чтобы рассеянные по схеме паразитные конденсаторы не мешали работе макета.

Еще одной существенной проблемой, связанной с беспаячными макетными платами, является наличие длинных выводов, что делает затруднительным установку эффективных конденсаторов фильтрации и развязки питания на небольшом расстоянии от кристалла.

Продолжим. Я подозреваю, что в некоторых макетных панелях, несмотря на их дороговизну, используется дешевая пластмасса типа капролона. В жаркую и влажную погоду сопротивление изоляции дешевых пластмасс будет невысоким. Я так и не знаю, какая именно пластмасса применяется в макетных платах.

И наконец, мистер Скотт Боуман (Scott Bowman) из Дублина (штат Калифорния) отметил, что, когда вы вставите в какое-нибудь отдельно взятое отверстие определенное количество проводов, беспаячный контакт начнет соскабливать с проводов заметное количество полуды. Стружки припой постепенно накопятся и начнут вызывать перемежающееся замыкание с соседними шинами. Более того, эти стружки обычно прилипают к клеящему составу, удерживающему на месте заднюю крышку макетной панели, после чего их нельзя ни удалить с помощью растворителя, ни сдуть струей воздуха.

Я даже не думал о макетных панелях, так как очень редко встречался с ними в практической работе. У них слишком много недостатков, поэтому для серьезного дела они не годятся. Если вы все-таки решите воспользоваться этими панелями, то не говорите, что я вас не предупреждал.

Литература

1. Pease, Robert A., “*Practical Considerations for the Design of High-Volume Linear ICs*”, IEEE International Symposium for Circuits and Systems, April 1990.
2. Pease, Robert A., “Band-Gap Reference Circuits: Trials and Tribulations”, IEEE Bipolar Circuits and Technology Meeting, September 1990.
3. Pease, Robert A., “What’s all this SPICEy Stuff Anyhow?”, *Electronic Design*, December 1990.
4. Leonard, Charles, “Is reliability prediction methodology for the birds?”, *Power Conversion and Intelligent Motion*, November 1988, с. 4.
5. Pease, Robert A., “A New Production Technique for Trimming Voltage Regulators”, *Electronics*, May 10, 1979, с. 141. (Также издавалось под названием Linear Brief LB-46 в составе “*Linear Applications Databook*”, National Semiconductor Corp., 1980–1990.)

13. ПИСЬМА БОБУ

Опубликовав в журнале EDN серию статей по вопросам поиска неисправностей, я получил множество откликов от читателей. Большинство из этих писем содержали полезные советы по поиску неисправностей и забавные истории, происшедшие с их авторами, поэтому я решил собрать самые интересные письма в отдельную главу, сопроводив их моими ответами и комментариями.

А советы продолжают и продолжают поступать...

Дорогой Боб!

Представляю вашему вниманию некоторые хитрости и уловки из практики:

1. Довольно сильными источниками шума в моей лаборатории являются повсеместно используемые дисплеи. Особенно сильно их влияние сказывается на работе низкочастотных трансформаторов.
2. Мне удалось избежать больших неприятностей, установив высокочастотные фильтры в схемах, предназначенных для работы с сигналами звуковых частот и на постоянном токе. На входные цепи таких устройств, рассчитанных на звуковые и сверхнизкочастотные сигналы, могут наводиться сигналы АМ радиовещания. Совершенно недопустимо, если из громкоговорителя устройства для мониторинга телефонной линии вдруг зазвучит музыка.
3. Наша компьютерная братия часто не может толком разобраться с тем, что происходит в процессе НАЧАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ или СБРОСА. Как-то раз я видел, как один термопринтер загорелся в результате перезапуска встроенного микропроцессора. На входных каскадах драйверов печатающей головки появилось третье (высокоимпедансное) состояние, естественно, ставшее причиной появления на их выходах логического уровня, соответствующего включенному состоянию термоголовки. Чуть позже ошибка в программном обеспечении привела к тому, что термоголовка снова оказалась включенной постоянно. В итоге мне удалось защитить термоголовку принтера от ошибок системы управления, установив между ней и ее драйверами

разделительные конденсаторы. Так что теперь, чтобы включить термоголовку, микропроцессору необходимо выдавать непрерывную последовательность импульсов.

4. Мои менее опытные коллеги часто забывают подсчитать суммарную мощность, потребляемую от источника питания.
5. Компания Vishay (Малверн, Пенсильвания) производит несколько типов очень точных и очень стабильных ($0,6 \text{ млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$) резисторов, которые я всегда держу под рукой для проверки омметров.
6. В некоторых компаниях считают, что можно сильно облегчить жизнь разработчиков, если забирать их приборы в метрологическую службу для калибровки, ни слова никому не говоря. Они не понимают, что ежедневные небольшие изменения характеристик приборов раздражают гораздо меньше, чем неожиданное скачкообразное изменение, вызванное перекалибровкой.
7. Мои коллеги-компьютерщики часто теряют зажимы заземления от щупов осциллографов – они сильно мешают им и иногда закорачивают питание. Я устал с этим бороться и купил коробку зажимов, которую держу у себя в столе.
8. Необходимо признать, что, как это ни печально, подключение к неправильно работающей схеме щупа осциллографа иногда может вернуть эту схему к нормальной жизни. Подключение щупа добавляет некоторую дополнительную емкость, вполне достаточную для того, чтобы проглотить «иголки» или остановить «гонки». При исследовании КМОП схемы с плавающими входами входное сопротивление щупа по постоянному току может оказаться достаточно низким для того, чтобы уровень сигнала на «висящем» входе снизился до нормального рабочего уровня.
9. Однажды меня вызвали на производство, чтобы я заставил работать созданную мной «нехорошую» схему. Жаловались на дрейф смещения нуля по постоянному току у операционного усилителя. Когда я прибыл на место, то обнаружил, что к этому усилителю техник подключил хороший цифровой вольтметр с помощью отрезка коаксиального кабеля – для того, чтобы избежать наводок и шумов. Емкость этого кабеля, естественно, вызвала самовозбуждение операционного усилителя. Режимы работы по постоянному току нельзя измерять, если операционный усилитель самовозбуждается. Иногда техники подсоединяют осциллограф к схеме именно таким образом для того, чтобы получить большее усиление, или потому, что не смогли найти штатный щуп 1:10.
10. Щупы работают правильно только при строго определенной, характерной для каждой модели входной емкости осциллографа. Не всегда можно взять щуп от одного осциллографа и использовать его для подачи высокочастотного сигнала на другой.
11. Для того чтобы самым простым способом проверить схему, нужно провести над ней рукой. Это позволяет быстро выявить места перегрева. Если произошло неожиданное защелкивание какого-нибудь элемента, но он не задымился, то этот метод часто позволяет обнаружить место неисправности.

12. Компания Edmund Scientific (Баррингтон, Нью-Джерси) продает термочувствительные жидкокристаллические пластины. Прикладывая эти пластины к схеме, можно выявить области незначительного перегрева. Это оборудование особенно удобно в тех случаях, когда исследуемая плата сравнивается с заведомо исправной схемой.
13. Сотрудники конструкторских отделов иногда ошибочно полагают, что принципиальная схема устройства – это их собственность, и ее единственное назначение – служить в качестве плана расположения проводов для разводки печатных плат. Но после того как готова разводка платы, принципиальные электрические схемы нужны для проведения производственных испытаний, для отделов сопровождения производства, для службы гарантийной и послегарантийной поддержки. Чертежники часто опускают пометки, которые я размещаю на этой схеме, фиксируя параметры полюсов и нулей для фильтров, температурные коэффициенты, нормальные значения напряжения переменного и постоянного тока, формы сигналов и информацию о терморежимах. Доводя эту информацию до техников с самого начала проекта, я избавляюсь от большого количества телефонных звонков в будущем.
14. Из электрической лампочки накаливания и операционного усилителя можно собрать генератор синусоидальных колебаний, который обладает чрезвычайно низким уровнем нелинейных искажений сигнала (и заметным микрофонным эффектом). Я обнаружил эту схему в Руководстве по применению AN 5, выпущенном компанией Linear Technology (Милпитас, Калифорния). Я собрал 3-частотный генератор (400, 1000 и 2800 Гц) в маленькой металлической банке из-под пива. Коэффициент нелинейных искажений получился меньше –80 дБ.
15. Если значение напряжения постоянного тока на схеме меняется оттого, что на нее подышали, то ваша печатная плата наверняка загрязнена.
16. При проведении различных измерений в схемах с малыми уровнями сигналов и высоким коэффициентом усиления необходимо повторить все измерения в темноте или сумерках. Вы удивитесь, когда узнаете, что многие радиоэлементы обладают фоточувствительностью и прозрачными для инфракрасных лучей корпусами. Одному моему коллеге встретился фоточувствительный операционный усилитель в металлическом корпусе – свет в него проникал через изоляторы вокруг выводов.
17. Защитные диоды могут выпрямлять высокочастотные шумы и радиосигналы.
18. Компания Micro Technical Industries (Лагуна Хиллз, Калифорния) выпускает ручной температурный датчик с подогревом. Им можно индивидуально нагревать разные элементы схемы. Предусмотрена возможность использования с этим пробником различных наконечников, оптимально располагающихся на тех или иных деталях: маленьких и больших резисторах, операционных усилителях в металлическом корпусе и корпусах DIP различных типоразмеров.
19. Некоторые устройства выборки и хранения чувствительны к скорости нарастания управляющего напряжения на цифровом входе.

20. Даже триггеры Шмитта могут быть в метастабильном состоянии.
21. В рекомендациях, подготовленных компанией Analog Devices (Норвуд, Массачусетс), есть интересное замечание: «Вы можете всегда надеяться на свою мать, но никогда не должны надеяться на заземление».
22. Устройства, в которых используется монтаж накруткой, работают просто отлично в том случае, если удастся правильно расположить шины питания и заземления. Если у меня нет платы со встроенной разводкой систем заземления и питания, то для работы с высокочастотной логикой я использую провод большого диаметра, который развожу в виде прямоугольной мелкой сетки.
23. Иногда использование батарей для питания исследуемых цепей позволяет ликвидировать паразитные земляные петли и избавиться от шумов и помех питающей сети.
24. В работе может пригодиться пассивный узкополосный режекторный фильтр с центральной частотой 60 Гц, собранный по схеме двойного Т-образного моста, который разрешается разместить в небольшой коробке от фруктовых пастилок или леденцов, снабдив ее двумя соединительными гнездами под штекеры для подключения входного и выходного сигналов.
25. Также полезен будет расположенный в другой такой же коробочке усилитель с высоким входным сопротивлением и усилением 20 дБ. На рис. 13.1 приведена схема усилителя, работающего на звуковых частотах.
26. В операционном усилителе коэффициент ослабления синфазного сигнала не является линейной функцией от напряжения синфазного сигнала. В неинвертирующих схемах эта нелинейность часто оказывается наиболее существенной причиной искажений сигнала.
27. Некоторых инженеров трудно заставить подготовить описание проекта. В соответствии с принятым в нашей компании порядком конструкторское бюро не начинает проектирование печатной платы до тех пор, пока ее разработчик не представит описание проекта. У начальника конструкторского отдела не возникает проблем при проведении в жизнь этой политики, так как он неподотчетен высшему руководству инженеров-разработчиков. Внутреннее негодование разработчиков высшего уровня отражается на качестве таких описаний.
28. Фрагментарные, но детальные схемы, которые иногда встречаются в технических описаниях компании National Semiconductor, позволяют четко понимать, что можно ожидать от той или иной микросхемы в необычных условиях. Я прошу вашу компанию и дальше придерживаться выбранной политики.

Рой Мак-Каммон (Roy McCammon),
3M/Dynatel, Остин, Техас

Мои приветствия мистеру Мак-Каммону!

Позвольте поблагодарить вас за комментарии, многие из которых просто замечательные.

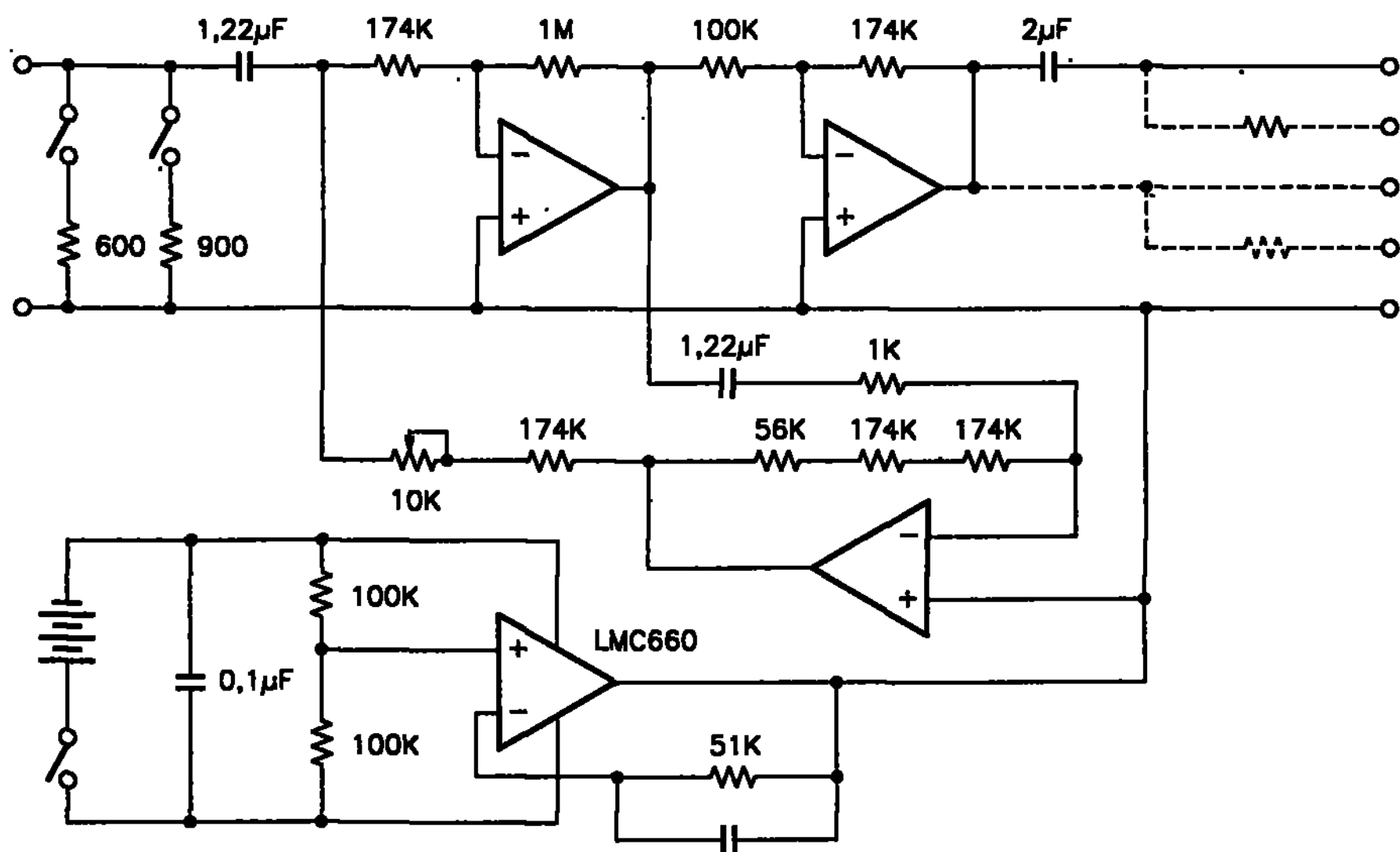


Рис. 13.1. Схема усилителя для поиска неисправностей с высоким входным сопротивлением и коэффициентом усиления 20 дБ, работающего на звуковых частотах

Примечание к рис. На мой взгляд, было бы полезно добавить фрагменты, показанные штриховой линией.

Ниже приведены мои соображения по некоторым вашим замечаниям:

1. Наводки от видеомониторов? Я не сталкивался с такой проблемой, но в ряде случаев подобные шумы могут вызывать значительные трудности. У меня нет *цифровой* вычислительной машины рядом с рабочим столом, но у кого-то ведь есть. Как было отмечено в главе 2, если к компьютеру или клавиатуре поднести АМ радиоприемник, то это позволит услышать скрипучие радиочастотные шумы самой разной интенсивности.
2. Я тоже рекомендую использовать фильтрование по высоким частотам. Однако вы особо подчеркнули, что задача такого фильтрования – борьба с радиочастотными шумами из эфира и внешней среды. Я редко думал о подобных аспектах фильтрования, но вы правы.
3. О да, я в этом не сомневаюсь. Есть умельцы, способные построить схемы с характеристиками, прямо противоположными понятию «надежный».
4. В этом я тоже не сомневаюсь. Однако от технических описаний как на цифровые, так и на аналоговые интегральные схемы толку будет немного, потому что из них можно узнать только о мощности, потребляемой в статическом режиме. А о том, что изменится при быстрых или медленных колебаниях выходного сигнала, там информации нет. Даже ТТЛ микросхемы потребляют большую мощность при работе на высоких частотах.
5. Уверен в том, что большинство резисторов компании Vishay работают абсолютно стабильно. Лично я для проверки омметров использую несколько старых проволочных резисторов. Некоторые из них были выпущены так давно,

- что старше даже самых старых резисторов производства Vishay. Следовательно, я точно знаю, что они обладают отличной долговременной стабильностью, что, на мой взгляд, гораздо важнее, чем их температурный коэффициент.
6. Согласен с тем, что «телепортация, или полтергейст» оборудования на поверку и калибровку – серьезная проблема. В нашей группе приборы обычно исчезают на перекалибровку именно в тот момент, когда мы отчаянно в них нуждаемся. Нам все-таки удалось решить эту проблему, издав распоряжение, в соответствии с которым инженеры ставят требующее поверки или калибровки оборудование на выделенную для этого полку. Сотрудники службы главного метролога забирают в поверку *только* оборудование, стоящее на этой полке.
 7. Тенденция пропажи частей щупов осциллографов и выводов заземления несомненна. Средства на их пополнение мы закладываем в бюджет ежегодно, так что истощение запасов нам не грозит.
 8. Бесспорно. Влиять на результаты измерения взглядом может не только профессор Гейзенберг (Heisenberg).
 9. Вы совершенно правы, утверждая, что подключение большого куска коаксиального кабеля на выходы операционного усилителя, скорее всего, не улучшит, а ухудшит его работу. Мне понятны ваши жалобы на то, что дураков просто тянет на подвиги такого рода. Они говорят: «Покажите, где написано, что этого делать нельзя».
 10. Тонкое замечание по поводу совместимости щупов. Иногда переберешь все варианты настройки, а щуп все никак не хочет скомпенсироваться.
 11. Интересное замечание. Часто, для того чтобы узнать, нагрет ли мой паяльник и готов ли он к работе, я проверял его, поднеся его кончик к носу – на расстояние приблизительно 2,5 см.
- Примечание:** у людей есть инфракрасные рецепторы, расположенные в губах. Если, закрыв глаза, медленно поднести ладонь тыльной стороной к губам, то можно почувствовать присутствие руки. Необходимо использовать тыльную сторону руки, так как мозоли на ладони блокируют тепловое излучение.
13. Вы особо отметили, что «конструкторские отделы часто забывают внести пометки и примечания». Там, где я работаю, конструкторские отделы выполняют поставленную задачу и добавляют в чертеж все, что потребует разработчик. Должен сказать, что я, как правило, самостоятельно готовлю чертежи для своих разработок.
 14. Обычно я не проявляю большого энтузиазма по поводу использования ламп накаливания для стабилизации амплитуды. Действительно, у большинства генераторов нелинейные искажения превышают уровень –80 дБ, но можно пропустить выходной сигнал обыкновенного генератора через фильтр и получить уровень нелинейных искажений ниже –80 дБ.
 16. Да, я в это верю. Нам удалось выяснить, что у наших усилителей с минимальным входным током, таких как LMC662, утечки минимальны в том случае, когда усилитель помещен в пластмассовый корпус DIP, процесс изготовления

которых полностью автоматизирован и никто до них руками не дотрагивается. Корпуса типа ТО-99 и CERDIP гораздо хуже пластмассовых корпусов мини-DIP, сопротивление изоляции которых устойчиво повторяется на уровне 10^{15} Ом.

17. «Защитные диоды могут выпрямлять высокочастотные шумы и наводки». Я никогда ничего подобного не видел. Рой, старина, должно быть, вы живете в условиях, *безнадёжно испорченных* внешними радиочастотными шумами. Вы, наверное, можете слушать транзисторный радиоприемник без батарей.
18. Я забыл где-нибудь упомянуть термощупы. Мы используем эти щупы в большей степени для испытаний и контрольных проверок, чем для поиска неисправностей. Паяльник чаще всего позволяет найти неисправность быстрее, хотя и более грубым способом.
19. В технических описаниях на микросхемы LF198 упоминается о том, что нельзя допускать, чтобы сигнал, подаваемый на вход ВЫБОРКА, изменялся слишком медленно. Имеются ли другие устройства выборки и хранения, которые к этому столь же чувствительны? Те, в технических описаниях на которые ничего не сказано об этой особенности?
22. Мне редко доводилось работать с изделиями, в которых используется монтаж накруткой, но я готов поспорить на что угодно, что очень многие сильно испортили себе нервы из-за плохо организованной разводки цепей питания и некачественной развязки этого питания – независимо от того, на каких интегральных микросхемах собрано устройство: на аналоговых или на цифровых.
23. Я редко сталкивался с ситуациями, когда батареи были необходимы. Но в исключительных случаях они могут оказаться полезны.
24. У меня нечасто возникает потребность избавиться от влияния 50- или 100-герцевых помех и наводок. Обычно я визуально вычитаю составляющие 50 Гц прямо из картинки на экране осциллографа.
25. Действительно, портативные предусилители часто могут быть полезными.
26. Как я уже отмечал раньше, в главе 8, неразумно считать, что зависимость погрешности от синфазных сигналов – линейная.
27. Описания принципиальных схем – штука хорошая. Но, даже если схема спроектирована идеально, я считаю, что не менее важна и разводка платы. Так что «пивная проверка» с участием всех ваших коллег также остается чрезвычайно эффективной и полезной.

Р. А. Пиз

Дорогой Боб!

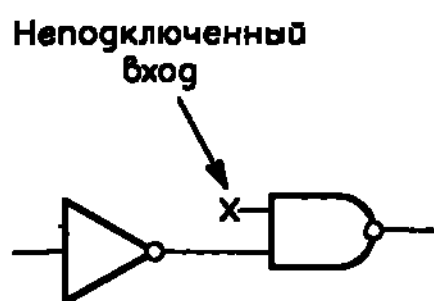
Вот уже много лет я работаю техником. В ваших книгах мне встретился ряд вопросов, по которым хотелось бы высказать свою точку зрения и поделиться собственным опытом.

На странице 130 в статье от 17 августа 1989 года (теперь это глава 7) вы упомянули о потенциальной опасности побочных эффектов, наблюдаемых при отборе тока базы транзистора. В большинстве (если не во всех) импульсных источников питания, с которыми мне довелось работать, используется именно данный подход – для того, чтобы быстрее выключать транзистор, носители удаляют из базы.

Данный метод отлично работает на практике. Я использовал его во многих преобразователях, которые самостоятельно разрабатывал, и за все это время ни одного отказа компонентов схемы не произошло. Обычно я просто добавляю какую-нибудь схему ограничения обратного напряжения для того, чтобы гарантировать, что напряжение на переходе база-эмиттер не превысит напряжения туннельного (Зенеровского) пробоя.

Обратимся к вашим замечаниям на 132 странице, в этой же статье. Я вынужден не согласиться с тем, что вы считаете вполне допустимым подключение интегральных микросхем с МОП структурой в панельки при включенном питании. Я считаю, что этого делать не стоит, так как в данной ситуации питание на кристалл может быть легко подано через выводы входов или выходов. Некоторые производители оборудования косвенно запрещают это в технических условиях, в разделе «Электрические характеристики». Мне приходилось быть свидетелем того, как в результате подобных действий устройства ломались. Кроме того, я не могу согласиться с вашим замечанием о том, что нет необходимости надевать заземляющий браслет при работе с МОП интегральными схемами.

Рис. 13.2. «Плавающий» вход



Рискованно оставлять верхний (по схеме) вход ТЛ элемента ни к чему не подключенным. Это никоим образом не будет сказываться на макетной плате, а проявится только после того, как схема будет передана в производство. Необходимо подключать такие входы к шине $+V_s$ через резистор сопротивлением 1 кОм или около того.

Мой опыт, а также опыт моих коллег свидетельствует о том, что обращаться с МОП интегральными схемами необходимо очень аккуратно и даже нежно, иначе их среднее время наработки на отказ значительно сокращается. Проблема в том, что эти схемы редко отказывают сразу, но, будучи однажды перегружены тем или иным образом, неизбежно откажут, причем в самый неподходящий момент.

Обратимся к статье в номере журнала EDN от 28 сентября 1989 года (глава 4). Считаю необходимым предостеречь вас относительно использования танталовых конденсаторов. Во-первых, они обладают меньшей устойчивостью к обратной полярности, чем даже алюминиевые электролитические конденсаторы. Обратная полярность может явиться результатом, скажем, использования танталовых конденсаторов в качестве разделительных в схемах с операционными усилителями. Во-вторых, я уж и не вспомню, сколько танталовых конденсаторов мне пришлось заменить, потому что в них произошло внутреннее короткое замыкание без каких-либо видимых причин.

Самое неудачное место для размещения дефектного танталового конденсатора – материнская плата компьютера, где я и обнаружил последний из тех, которые мне пришлось заменять. Первоначально проблема сводилась к поиску замыкания, ставшего причиной аварийного выключения питания. Выяснить, на какой именно шине образовался дефект, было достаточно просто. Но к шине было подключено много элементов, поэтому стоило попытаться применить что-нибудь менее радикальное, чем временное отключение определенного участка шины. Мне

удалось найти решение этой проблемы, подав через резистор сопротивлением 1 кОм синусоидальный сигнал частотой 10 кГц и эффективным напряжением 1 В и пронаблюдав за изменением осциллограмм с помощью токового датчика. Отказавший элемент был обнаружен меньше чем за минуту. Вероятно, мне повезло, но, с другой стороны, подаваемый тестовый сигнал не мог вызвать в интегральных микросхемах ток сколько-нибудь заметной силы и имел достаточно низкую частоту для того, чтобы вызывать слишком большой ток в исправных развязывающих конденсаторах.

В этой же статье вы отметили, что достаточно безопасно оставлять свободными неиспользуемые входы ТТЛ схем. Я бы не считал это утверждение справедливым для всех ситуаций, особенно для тех, когда уровень внешних шумов достаточно велик. Часто довольно значительные неприятности возникают оттого, что подобная практика вызвала появление случайных импульсов или «иголок». Схема, показанная на рис. 13.2, представляет собой пример абсолютного кошмара. Тем не менее подобные варианты включения встречаются очень часто в буферных логических схемах на произведенных в Азии «клонах» IBM PC, особенно на материнских платах под процессоры 80386, широко использующие высокочастотные тактовые сигналы.

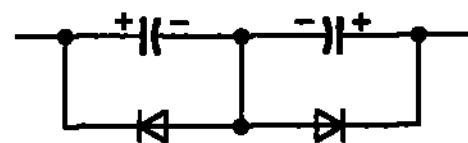
Малькольм Ваттс (Malcolm Watts),
Веллингтонский политехникум,
Веллингтон, Новая Зеландия

Дорогой мистер Ваттс!

Спасибо вам за комментарии. Вы спрашиваете об особенностях отбора тока из цепи базы транзистора. Если бы вы действительно решили «вытянуть» ток из базы, но при этом в транзисторе переход база-эмиттер оказался бы в режиме туннельного (Зенеровского) или, что хуже, лавинного пробоя, то транзистор мог быть поврежден.

Рис. 13.3. Неполарный танталовый электролитический конденсатор

Схема позволяет сделать танталовый электролитический конденсатор нечувствительным к подключению в обратной полярности.



Если вместо этого некая цепь предотвращает туннельный пробой и используемые в ней ограничители блокируют чрезмерное обратное напряжение V_{BE} , тогда все отлично. Возможно, я не очень понятно изложил эти моменты. Учтите, что многие дискретные транзисторы не столь нежны, как интегральные – они не будут сожжены и их свойства не ухудшатся из-за туннельного пробоя. (Я не очень хорошо понимаю, почему именно.)

Вы также выступаете против подключения КМОП элементов в устройства при включенном питании и проведения работ без заземляющего браслета. Вы пишете, что видели, как подобные действия стали непосредственной причиной отказов и снижения надежности. Ну хорошо, вы это видели и еще кто-то видел. Но я-то с этим не сталкивался. Микросхемы оперативной памяти, возможно, требуют более аккуратного обращения, чем микросхемы серии 74Схх. В таком случае я должен

взять назад свои опрометчивые и легкомысленные заявления: в общем случае необходимо использовать браслет заземления и подключать интегральные схемы к работающим схемам только в том случае, когда вы уверены в том, что делаете, и готовы мириться с возможными отказами интегральных схем.

Несмотря на это, при поиске неисправностей иногда может возникнуть необходимость использовать именно такой подход. Вы должны знать, что это вовсе не обязательно приводит к повреждениям. Однако мне, а также моим читателям необходимо учитывать, что иногда подобные действия *могут* привести к повреждению схемы. Так что не стоит этим злоупотреблять без особой необходимости.

Теперь о том, что касается танталовых конденсаторов. Очень редко сталкивался с их отказами без видимых причин. Я использовал очень много дешевых танталовых конденсаторов, и они, судя по всему, оказались более надежными, чем можно было бы предположить. Для того чтобы гарантированно защитить их от появления напряжения обратной полярности, я предлагаю использовать схему, показанную на рис. 13.3.

Заслуживает внимания метод использования пробника с датчиком тока для поиска коротких замыканий в схемах, но как вам удастся располагать этот пробник вокруг дорожки на печатной плате, не могу понять. Я нахожу, что мой микровольтовый детектор постоянного тока (см. главу 2) позволит выявить подобные короткие замыкания и по постоянному току. Если же придется чинить много плат, то я уверен, очень пригодится один из ваших милливаттных детекторов со «звуковой сигнализацией».

Хотя я ни разу не сталкивался с проблемами, вызванными свободными входами ТТЛ вентиля, однако опасность использования каскадов, подобных тому, что приведен на рис. 13.2, несомненна.

Р. А. Пиз

Дорогой Боб!

За те 30 лет, что я проработал в электронной промышленности, мне довелось столкнуться с несколькими аномалиями, о которых вы не упомянули в своих статьях:

1. ТТЛШ микросхемы с малым потреблением абсолютно не переносят отрицательных выбросов на фронтах импульсов на входных выводах. Самыми проблемными из всех микросхем, встреченных мною, являются элементы 74LS86, которые на несколько микросекунд «подвисают», полностью нарушая работу остальной части схемы. Второе место по уровню создаваемых проблем занимают микросхемы типа 74LS75, которые после отрицательного выброса могут перейти в произвольное логическое состояние, но, правда, восстанавливают работоспособность после очередного тактового импульса.
2. Мне встречались разработки на интегральных микросхемах типа 7470, -73, -76, -107, -110 или -111, которые «запоминали» высокий логический уровень на линиях ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (Preset) и УСТАНОВКИ НУЛЯ (Reset) и переключались совершенно независимо от присутствия рабочего фронта тактового импульса. Подобная аномалия наблюдалась в том

случае, если уровень на линиях тактовых сигналов надолго оставался высоким после прихода рабочего фронта.

Дж. Кунц (J. Koonz),
главный инженер Computer Automation,
Ирвайн, Калифорния

Дорогой Боб!

Если какой-нибудь инженер захочет посмотреть, как правильно экранировать источник электромагнитных помех, то ему (или ей) следует изучить шасси любого телевизора или тюнера. Скорее всего, паразитное электромагнитное излучение от всех генерируемых внутри этих устройств колебаний с частотами от 15 кГц до 950 МГц удовлетворяет требованиям, устанавливаемым главой 15 правил Федеральной комиссии связи (США). Не вызывает сомнения, что пластмассовые корпуса большинства телевизоров не могут служить преградой для побочного излучения.

Я уже некоторое время работаю с лабораториями, где пытаются сертифицировать «лучшее» оборудование, при разработке которого не учитывались основные принципы экранирования электромагнитных волн. Эти методы восходят к временам ламповых схем и подразумевают использование специальных элементов, таких как проходные конденсаторы, ферритовые бусины и катушки индуктивности на тороидальных сердечниках. Кроме этих элементов применялись также сделанные из очень тонкой луженой белой жести дешевые экранирующие оболочки для излучающих блоков и деталей.

После того как выводы этих закрытых с пяти сторон оболочек припаивали к печатной плате, вокруг источника излучения создавалась закрытая со всех шести сторон экранированная камера. Учтите, что печатные платы телевизоров имели достаточно большую площадь земляной шины.

Если в созданной вами конструкции не предусмотрена защита от электромагнитных помех и не выполнены требования по электромагнитной совместимости, то для того, чтобы исправить допущенные недоработки, кому-то еще придется пристраивать к вашей модели несколько *жестяных* коробочек от пластырей Band-Aids.

Моменты, которые необходимо учитывать:

1. Предусмотрите «земляной слой» максимально возможного размера на одной из сторон каждой печатной платы, на которой расположены цифровые или аналоговые блоки, работающие на частотах, превышающих звуковой диапазон. Убедитесь в том, что соединение этого «слоя» с основным шасси имеет малую паразитную индуктивность – даже в том случае, если это соединение через печатный разъем.
2. Во все входные и выходные линии встройте Т- или LRC-фильтры. Резисторы должны всегда располагаться со стороны входных или выходных разъемов и иметь максимально возможные для конкретного случая сопротивления, вплоть до 1 кОм. В этом случае они будут не только отфильтровывать

шумы, но и демпфировать или снижать добротность любых паразитных резонансных цепей, которые могут образовываться при подключении соединительных кабелей. Необходимо очень тщательно подбирать резисторы и конденсаторы так, чтобы они не оказывали неблагоприятного влияния на полезные сигналы в схеме. В качестве конденсатора необходимо использовать керамический дисковый емкостью, в зависимости от источника сигнала, от 10 пФ до 0,01 мкФ. Каждую из цепей, в которой установлен фильтр, нужно проверять: после нее в схеме должен присутствовать только полезный сигнал.

3. Исследуйте каждую плату с целью выявления областей максимальной интенсивности паразитного излучения. Экспериментируйте с металлизированными пленками или металлической фольгой для определения мест оптимального размещения металлических экранов. Проверить эффективность экранирования можно, используя припаянные к «земляному» слою временные экраны.
4. Проверяйте наличие и качество фильтров на линиях ввода/вывода и уровня паразитных электромагнитных излучений на покупных дисководах и источниках питания.
5. Сигнал, подаваемый на схему, можно пропустить через серийно выпускаемый фильтр или соответствующий ему аналог – это позволит проверить уровень любых внешних наведенных помех (должен быть как минимум на 20 дБ ниже, чем требуется).
6. В ходе нормальной работы контролируйте линии ввода/вывода схемы и прослеживайте все паразитные сигналы вплоть до их источника. И опять уровень любого внешнего наведенного шума должен быть как минимум на 20 дБ ниже порогового значения.
7. Вне зависимости от того, каким методом вы будете пользоваться для измерения уровня излучений в ближней зоне вашей конструкции, измеренный уровень должен быть как минимум на 20 дБ ниже, чем рекомендуемое предельное значение уровня излучения на расстоянии 3 м. Для проведения таких измерений может понадобиться защищенная экранированная испытательная камера.

Томас Л. Фишер (Thomas L. Fischer),
Pacific West Electronics,
Коста Меса, Калифорния

Дорогой Боб!

Вы рекомендуете устанавливать параллельно клеммам источника питания диоды «защиты от переполюсовки» (см. рис. 13.4а) для того, чтобы защитить схему от подключения питания в обратной полярности. Однако если источник питания все же будет подключен в обратной полярности надолго, то через защитные диоды потечет ток большой силы, что может повредить или разрушить их. Не будем забывать о том, что диоды – такая же *часть* схемы, как и собственно схема, защищаемая ими. Я предлагаю вместо параллельного использовать последовательное

подключение диодов (рис. 13.4b). Теперь плата обеспечена защитой, но ток при этом через диоды течь практически не будет.

Марвин Смит (Marvin Smith),
Харбор-сити, Калифорния

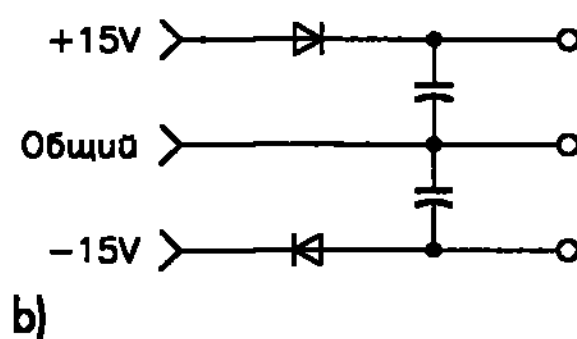
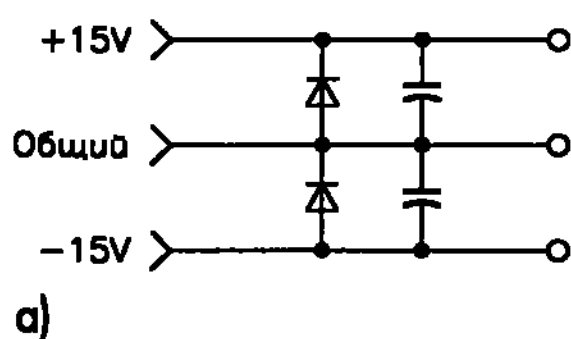


Рис. 13.4. Варианты защиты от переплюсовки

В зависимости от типа устройства могут понадобиться диоды, защищающие от подключения питания в противоположной полярности, параллельно (a) или последовательно (b) разъемам подключения питания. Допускается использовать одновременно оба варианта.

Дорогой мистер Смит!

Предлагаемый вами способ отлично пригоден для ряда цепей, и я, кажется, виноват в том, что не упомянул об этом. Поясню на примере. Если вы используете батарею, то последовательное подключение диодов в правильном направлении может сработать. В этом случае, при подключении питания обратной полярности, батарея не замкнута на землю и вы избежите повреждения батареи и окружающих ее элементов. Однако, если бы вы подключились к 5-вольтовой шине питания, то диод, установленный последовательно с источником питания, не только «протер» бы заметную часть напряжения источника питания, но и, что вполне возможно, привел бы к снижению коэффициента стабилизации источника питания.

При использовании источника питания напряжением даже 15 В, при котором потери мощности могли бы считаться приемлемыми, резкие броски напряжения и некачественная стабилизация могли бы вызвать сбой в работе схем, запитанных от этого источника. Причиной понижения качества стабилизации может послужить полное сопротивление этих диодов. Таким образом, в случаях, когда стабилизатор напряжения работает на шины, а не на отдельную схему, лучше всего пользоваться схемой параллельного подключения диодов защиты от переплюсовки. Использование такого метода подразумевает, конечно, что источник питания снабжен системой защиты от коротких замыканий выхода.

Слабое место вашей схемы, мистер Смит, проявляется, если один из подводящих питание проводов отваливается или его отключают. В данной ситуации напряжение на шине -14 В могло бы подняться до $+5$ или $+10$ В, в зависимости от нагрузки между шинами -14 и $+14$ В. Многим аналоговым схемам «не поздоровится», если напряжение на отрицательном полюсе питания поднимется выше уровня земли.

Даже если с интегральными схемами проблем не возникнет, на электролитические конденсаторы фильтрации питания будет подано напряжение обратной

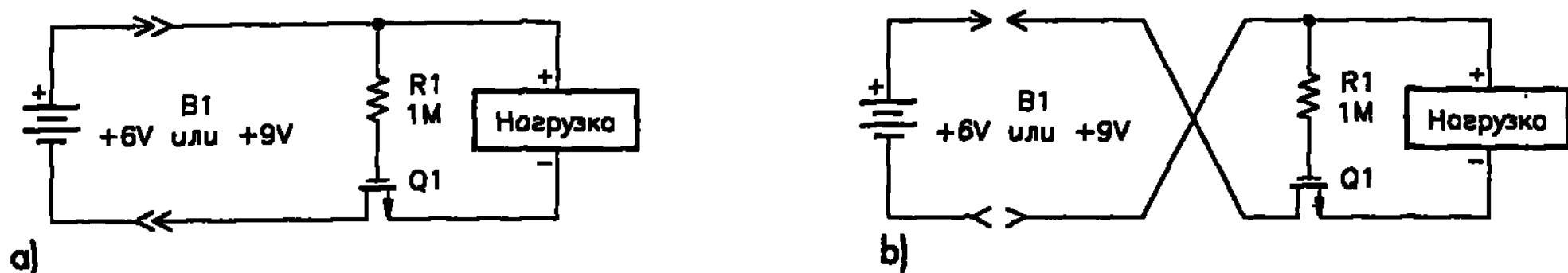


Рис. 13.5. Защита по Пизу

Устройство лишено недостатков схем, использующих только параллельное или только последовательное подключение диодов защиты от переполюсовки. Сопротивление резистора $R_1 = 1 \text{ МОм}$ достаточно для того, чтобы защитить схему от переходных процессов. Если напряжение питания превышает 15 В, то надо применить ограничитель или делитель напряжения на затворе V_{gate} , чтобы исключить его перегрузки или разрушение. Существует достаточно много МОП транзисторов с индуцированным каналом (с обогащением), которые подходят для использования в данной схеме, например транзисторы IRF511 и подобные ему.

полярности, что создаст угрозу потенциального разрушения этих конденсаторов, да и всего устройства.

Итак, мистер Смит, не хотите ли вы согласиться со мной, что к вашей цепи было бы неплохо добавить еще одну пару выпрямительных диодов для защиты от переполюсовки?

Так в каких же случаях проектировщики *не должны* использовать два диода, подключаемых по вашему совету последовательно, не используя еще два, которые подключаются параллельно? А в тех, когда используется питание с низким напряжением, большой силой тока или когда необходима очень хорошая стабилизация напряжения питания.

Вы совершенно справедливо отметили, что выпрямительные диоды должны выдерживать ток короткого замыкания стабилизатора. К счастью, диоды 1N5400, рассчитанные на прямой ток до 3 А, стоят всего \$0,19 штука.

Всего вам самого хорошего и огромное спасибо за ваши замечания. Вы сумели заметить то, что «озадачило эксперта».

RAP

P.S. Предположим, что вы установили диоды последовательно с вашей схемой, а в качестве источника питания используете пару батарей. Тогда, если замкнуть 14-вольтовые шины, то как обеспечить сохранность диодов в этой ситуации? Может, нужно последовательно с каждым диодом поставить предохранитель? Или стоит поставить предохранитель последовательно с шинами питания? Это всего лишь иллюстрация того, что все не так просто!

Недавно я разработал схему [1], чтобы выполнить заказ клиента, которому требовалось исключить недостатки каждого из рассмотренных подходов: и потерь при последовательном подключении, и проблем, связанных с закорачиванием питания при переполюсовке. На схеме (рис. 13.5) МОП транзистор открывается, если полярность источника питания правильная, и закрывается, если полярность обратная. В настоящее время сопротивление у дешевых МОП транзисторов в открытом

состоянии совсем невелико, так что потери, вызываемые его последовательным подключением, составят гораздо меньше 0,5 В на диоде. Существует достаточно много МОП транзисторов с индуцированным каналом (с обогащением), которые подходят для использования в данной схеме, например транзисторы IRF511 и ему подобные.

Да, эта схема выглядит забавно. Да, она спроектирована правильно и, несомненно, работает хорошо.

Дорогой Боб!

При изготовлении «тестовых элементов» для отладки схем и устройств я приклеиваю конденсаторы и резисторы эпоксидным клеем к пластиковым палочкам от эскимо. Выводы у таких элементов я делаю короткими – приблизительно 0,8 см, причем отрезаю излишки их под углом для того, чтобы получались аккуратные заостренные концы – контактные «иголки». В результате емкость тела и пальцев практически не оказывает влияния на физические характеристики элементов.

Если использовать палочку от мороженого, а не просто держать деталь пальцами или закрепить ее на длинном отрезке термоусадочной трубки, то появятся некоторые преимущества. Во-первых, палочки от мороженого гораздо жестче, чем термоусадочные трубки. Во-вторых, пользоваться более длинными палочками от мороженого удобнее. У меня есть целый ящик подобным образом подготовленных конденсаторов и резисторов, что дает возможность пользоваться очень эффективным и портативным набором для настройки и отладки схем.

Джон Ардиззони (John Ardizzony),
M/A-COM, Лоуэл, Массачусетс

Уважаемый господин Ардиззони!

Если вы заглянете в специализированные магазины – те, которые обслуживают электронщиков, радиоинженеров и радиолюбителей, то сможете обнаружить там рекламные объявления о продаже похожих на описанные вами «наборов для настройки схем», в которые входят конденсаторы с емкостями в пределах 0,1–1000 пФ. Приблизительно за \$50 можно купить готовый к использованию набор из 20 штук в компании American Ceramics Corp., 1 Norden Line, Huntington Station, NY, 11746-2102 (516) 271-9600. Не вызывает сомнений, что они считают вашу идею гениальной, – их клиенты готовы платить за готовые к применению изделия, у которых вместо палочки от мороженого применяются аккуратные пластмассовые ручки. Но изготавливая их самостоятельно, вы можете использовать любой нужный вам тип и номинал и затратите на это всего несколько минут.

RAP

Уважаемый Боб!

Я применяю термочувствительную краску марки Tempilaq производства компании Tempil (Южный Пейнфилд, Нью-Джерси) для контроля за температурой силовых устройств в металлических и пластмассовых корпусах, например таких, как корпуса ТО-220. Использую эту краску как при разработке системы, так и в готовых изделиях, отправляемых заказчику.

Краска предлагается нескольких сортов, рассчитанных на различные температурные пределы. Можно нанести на верхнюю часть каждого прибора полоски краски разного вида. И если компонент нагревается, каждая из термозависимых полосок начинает таять и плавиться при достижении определенной для нее температуры, навсегда изменяя внешний вид.

Кроме того, я использую эти краски для того, чтобы проверить относительную эффективность различных «теплопроводных» изолирующих прокладок. Они применяются для изолирования силового полупроводникового прибора от его радиатора. Я измеряю время, которое необходимо полоске краски для того, чтобы изменить состояние после подачи питания на испытательный стенд.

Я обнаружил, что эластомерные прокладки на кремнийорганической основе вообще не работают с корпусами типа ТО-220. У этих корпусов крепежный болт смещен от центра. В результате один край корпуса прижимается плотно, а другой слабо, что и приводит к плохой теплопередаче. Я просто не понимаю, зачем выпускать такие прокладки. Разве изготовители не проводили испытаний, прежде чем предложить товар потребителям?

Прокладки – это не единственная проблема. Один из пробных приборов в корпусе ТО-220 нагрелся так быстро, что мне пришлось производить «посмертное вскрытие». Я вскрыл корпус, попробовал освободить кристалл и обнаружил, что площадь его крепления к подложке составляла всего лишь около 15% площади самого кристалла. После случившегося я не доверяю этому конкретному изготовителю.

Билл Стерджон (Bill Sturgeon),
Sturgeon Engineering Co,
Петролия, Калифорния

Уважаемый мистер Стерджон!

Премного благодарен за ваш совет. Большая часть сотрудников нашей лаборатории не использует Tempiraq, тем не менее ваш совет просто замечательный. Для металлических корпусов мы используем термопары, а для кристаллов – специально предусмотренные диоды.

RAP

Уважаемый Боб, а что вы думаете по поводу электронных таблиц?

Без подписи

Уважаемый незнакомец!

Распечатками результатов электронных таблиц хорошо застилать обеденный стол, а при разработке аналоговых схем от них одни неприятности. Я их не выношу и обычно стараюсь обойтись без этих таблиц, так как ответ вы в них найдете, но с их помощью невозможно понять что важно, а что нет. Кроме того, иногда такие таблицы содержат искаженную информацию. При этом искаженным данным чаще всего слепо доверяют, никогда их не проверяя. Мы не один раз сталкивались

с таблицами, содержащими ошибочные сведения, причем ошибка довольно долго ни у кого не вызывала подозрений, оставалась неисправленной и даже считалась за бесспорную истину. В конце концов, проведя «санитарную проверку»¹, мы получили настолько глупый ответ, что поняли: никто никогда не проверял, есть ли смысл в содержащихся в ней данных. Не следует слепо доверять программам табличных расчетов (и результатам их работы тоже). Как, впрочем, и другим данным, получаемым в результате работы компьютера.

RAP

Уважаемый Боб!

Вы правы. Подавляющее большинство даже технически грамотных людей, которые должны бы разбираться в этом лучше, обычно смотрят на дисплей компьютера или на данные, полученные в результате его работы так, как будто это высечено в камне. При этом никто не обращает внимания на то, насколько несовершенным является устройство, сгенерировавшее цифры. Они просто благоговеют перед цифрами, нацарапанными на «желе» (в Jello²).

В 60-х годах с одним из начинающих инженеров, экспериментировавшим с новой аналоговой вычислительной машиной, произошла следующая история. Как-то раз он ворвался в кабинет главного инженера, потрясая пачкой листингов. «Смотрите! – возбужденно воскликнул он. – Я принес вам модель системы отопления и кондиционирования воздуха, внедрение которой позволит удвоить эффективность нашей электростанции!» Главный инженер взял распечатку, несколько минут полистал ее и ответил: «Да, точно. Но смотри сюда, – и он показал на диаграмму потоков. – При температуре 17 °F (~ –8 °C) вода будет слишком твердой и насосы просто не смогут ее перекачать».

Чувство разочарования, вызываемое дебрями системы меню у всех этих новых восхитительных приборов, вполне объяснимо. Больше всего я ненавижу ситуацию, которая, как мне кажется, начинает повторяться все чаще и чаще: когда сидишь и беспомощно смотришь на экран или курсор. При этом отлично понимаешь: упорное нежелание прибора выполнять то, что вы от него хотите, почти наверняка является следствием плохого знания системы меню и, вероятно, того, что вы не смогли тщательно изучить руководство по работе с прибором. Именно этим вы и собирались заняться сразу же, как только удастся выкроить свободную недельку-другую.

Продолжайте в том же духе.

Реджинальд В. Нил (Reginald W. Neale),
магистр точечной пайки,
Рочестер, Нью-Йорк

¹ Общий контроль на отсутствие тривиальных ошибок.

² Фирменное название концентрата желе.

Уважаемый мистер Нил!

Спасибо за ваши добрые слова. Ведь использовать воду при 17 °F – не такая уж страшная идея, достаточно добавить немножко антифриза. Настоящая проблема заключается в том, что можно легко получить воду температурой 17 °F зимой, когда она вам не нужна. Вот летом – другое дело, но в это время ее очень накладно охлаждать до такой температуры. Возможно, вам сгодились бы и водопроводная система, используемая как и ночное освещение от солнечных батарей с удлинителем на 12 000 миль.

RAP

Уважаемый Боб!

Меня очень смутил вариант замены, предложенный вами на странице 34 в журнале EDN от 23 ноября 1989 года. Мне понятна идея использования транзисторов, подключаемых вместо диодов, мы часто используем такой вариант включения.

Однако мы соединяем базу с эмиттером и, таким образом, применяем переход база-коллектор. Напряжение пробоя этого перехода, как правило, совпадает с максимально допустимым напряжением V_{ce} . А если использовать ваш метод, то в соответствии с техническими параметрами среднее напряжение пробоя будет в диапазоне 5–7 В. Обычно мне нужно, чтобы его уровень был выше.

Джон Пол Хоффман (John Paul Hoffman),
Caterpillar Inc, Пеория, Иллинойс

Уважаемый мистер Хоффман!

Вы правы, переход коллектор-база может выдержать более высокое напряжение, чем переход база-эмиттер, но зато последний включается/выключается быстрее.

Р. А. Пиз

Уважаемый Боб!

Несколько лет тому назад, когда я въехал в новый дом и в первый раз включил стереосистему, левый канал «поджарил» выходные транзисторы.

Усилитель мощности был охвачен петлей глубокой обратной связи, схемотехника его была стандартной, выходной каскад работал в режиме класса А или АВ. В нем была предусмотрена «фенечка», позволявшая выбирать уровень тока покоя выходного каскада. В ходе проверок я обнаружил, что при увеличении уровня тока покоя в левом канале, левый выходной каскад выходил из-под контроля при таком значении тока покоя, который правый канал выдерживал без проблем.

Выяснив это, я понял, что попал в тупик. У меня было две абсолютно идентичных схемы, одна из которых работала отлично, а настроить вторую в соответствии с рекомендациями не удавалось. Я заметил, что при исследовании с помощью осциллографа некоторых узлов в левом канале схема из-под контроля не выходила. Осциллограф не показывал ничего странного, тогда я предположил: что-то вызывает генерацию или самовозбуждение.

Теперь – одна очень важная деталь. Мой новый дом находился всего в двух кварталах от вершины холма, на котором располагалось антенное поле, в том числе

и комплекс АМ радиовещательной станции, работающей на частоте 970 кГц. Диапазон рабочих частот установленного в моей стереосистеме усилителя мощности был гораздо шире – 1 МГц. Я обнаружил, что если поместить конденсатор емкостью 0,1 мкФ между каждым из выводов разъема сетевого шнура и корпусом, то все работает нормально. По сетевым проводам в схему проникали радиопомехи, в результате чего начиналась своего рода генерация, приводившая к опасным перегрузкам. Увидеть эти колебания на экране осциллографа я не мог, так как провод заземления осциллографа шунтировал эти помехи на общее заземление.

Для себя я сделал следующие выводы:

- Одинаковые схемы не всегда одинаковые;
- «сырые» конструкции, которые хорошо работают на макете, могут отказать в реальной эксплуатации;
- Подсказки надо искать везде, где только можно.

Еще раз спасибо за ваши замечательные статьи.

Стив Коффман (Steve Coffman),
NovaTest, Бивертон, Орегон

Уважаемый мистер Коффман!

Мне кажется, что вы забыли упомянуть еще один пункт:

- Если определенный диапазон рабочих частот хорош, а более широкий диапазон частот еще лучше, то это вовсе не означает, что при дальнейшем расширении диапазона частот станет совсем здорово и отлично – наоборот, это может привести к катастрофе! Необузданное стремление к расширению диапазона рабочих частот усилителя мощности – один из способов гарантированно получить неприятности и проблемы.

Однако меня заинтересовал тот факт, что помеха с частотой 970 кГц проникала по цепи питания от сети, а не по кабелям, которыми подключались громкоговорители.

RAP

Уважаемый Боб!

В прошлом месяце я вместе с семьей посетил московский цирк. После окончания шоу я просто замер в своем кресле, рассчитывая увидеть продолжение. Так и серия ваших статей. В это письмо я вложил копию обращения в EDN, в котором прошу выпустить весь цикл статей отдельным как можно наиболее полным изданием. Кроме того, я решил написать вам персонально, чтобы поблагодарить.

Вы опубликовали огромное количество всего, что я узнал примерно за 20 лет, посвященных мной радиоэлектронике, и выделили из большого объема информации квинтэссенцию. Это было непросто сделать. Когда я готовил публикации для DECUS (Digital Equipment Computer Users Society – Общество пользователей компьютеров), мне довелось поработать и в роли автора, и в роли редактора. Так что я знаю, сколько труда пришлось вложить вам в издание этой серии статей. Bravo!

Наверно, я везучий человек. В мои служебные обязанности входит обслуживание, переделка конструкции и улучшение характеристик оборудования для радиационной терапии, компьютеров и т.д. В ходе работ я сталкиваюсь с сигналами разных частот и мощностей: от постоянного тока до микроволнового излучения S-диапазона и от пикоампер до мегаватт. Работать приходится как с аналоговыми схемами, так и с цифровыми. (Сложные, но захватывающие задачи встречаются при работе со схемами на пикоамперы и большей мощности. В последнем случае у элементов довольно часто бывают отказы типа «исчезновение».)

В конце концов мне удалось сформулировать три философских заповеди бытия (Господь завещал нам 10, но мне всегда было трудно одновременно помнить о нескольких вещах, поэтому трех для меня вполне достаточно):

1. Чем больше приборов вы используете, тем лучше. Однако надо быть уверенным, что знаешь, как пользоваться всеми инструментами. Если правила эксплуатации, возможности и недостатки измерительного оборудования неизвестны и не знаешь, как это оборудование влияет *на* цепь, в которой что-то «измеряешь», то это самообман. (Показательным примером является СВЧ оборудование – чтобы повлиять на его работу, достаточно просто снять с прибора крышку.)
2. Снимите шоры. (Не позволяйте втянуть себя в аналогово-цифровую войну.) Не надо заикливаться на любимом измерительном приборе или осциллографе, пренебрегая всеми остальными. Наоборот, следует понимать, что нет такого прибора, который в любой ситуации дал бы ответ, как не существует и единой универсальной схемы, которая была бы наилучшим решением для всех случаев. Перефразирую старую шутку на ту же тему: «Никогда не верь никому, даже своему любимому измерительному прибору». Это высказывание относится и почти ко всем опубликованным техническим описаниям.
3. И последнее. Не удастся исправить, если не понять, что происходит. Это самое простое и одновременно самое трудное. Даже если поставлен жесткий срок, обязательно потратьте время на то, чтобы изучить принципиальную электрическую схему, руководства по техническому обслуживанию, руководства по эксплуатации и все остальные документы, которые удастся добыть *прежде*, чем снимете крышку с прибора.

Еще раз спасибо за ваш замечательный труд.

Искренне ваш,
Фрэнк Р. Борджер (Frank R. Borger),
Центр радиационной терапии
Майкла Риза (Michael Reese)
и Чикагского университета, Чикаго, Иллинойс

Уважаемый мистер Борджер!

Вы пошли в цирк и не забыли о моих статьях? Это забавно – меня обычно вспоминают в зоопарке. Да, после того как начинаешь заниматься поиском неисправностей, жизнь становится действительно странной.

Спасибо за ваши письма. Мне понравились ваши заповеди. В третьей заповеди я бы добавил: если не разобраться в причинах проблемы, то решить ее значительно сложнее.

RAP

Уважаемый Боб!

Уже некоторое время вы печатаете серию отличных, как и всегда, статей. Этот цикл напомнил мне о тех временах, когда я мог почти все починить. Здравый смысл подсказывает, что необходимо передавать опыт такого рода следующим поколениям инженеров-разработчиков для сохранения традиций.

Однако, подобно всем нам – представителям старшего поколения, в ряде вопросов вы допустили несколько неточностей. А именно: от использования пистонов не отказались, особенно на многослойных платах. Они все еще отлично служат на экспериментальных двухсторонних, а также и на односторонних платах там, где планируется частая замена компонентов. В последнем случае на готовой плате устанавливается панелька с пистонами для того, чтобы все соединения были прочными. При использовании пистона на многослойной плате слой металлизации отверстия обязательно будет перекошен или смещен, что часто может привести к его отрыву от внутренних слоев меди. При тестировании данный дефект проявит себя как температурно-зависимая перемежающаяся неисправность, а устойчивый отказ может обнаружиться не раньше, чем плата попадет к клиенту или на место постоянной эксплуатации. В настоящее время хорошо оборудованные гальванические производства могут за вполне разумную плату изготавливать качественную металлизацию отверстий в печатных платах, так что давайте посмотрим, на что они способны.

Использование контровочных шайб на печатных монтажных платах сопряжено с некоторой опасностью. Работая в одной компании, нам пришлось потратить много денег, пытаясь разобраться, почему завинченные болты постоянно выкручивались из своих отверстий, в результате чего крепление плат к стойкам ослабевало. Неполадки возникали в ходе совместных термических и вибрационных испытаний. Если те же самые платы подвергались испытанию вибрацией без нагрева, то винты не ослабевали. Причиной всех проблем оказались циклы изменения температуры. В результате их воздействия платы расширялись и при температуре, близкой к температуре стеклования ($+125\text{ }^{\circ}\text{C}$), необратимо деформировались. При охлаждении всей системы причин, которые могли бы заставить материал занять исходное положение, не возникало, и крепление платы ослабевало. Крепление с любыми пружинными шайбами (типа «звездочка» или «Белльвилль») со временем ослабевает до такой степени, что необходимый в этом месте контакт нарушается или вообще пропадает. Если есть такая возможность, то лучше пользоваться пайкой. Если нужен винт, то сделайте под него площадку побольше и поставьте широкую шайбу – это позволит распределить нагрузку на большую площадь и максимально продлить срок жизни крепления.

Недавно я столкнулся с проблемой, которая возникает, когда конденсаторы, предназначенные для поверхностного монтажа, припаивают к печатной плате.

Если под конденсатором останется флюс, то его емкость может выйти за пределы, определяемые техническими условиями. Если после пайки будет удален не весь флюс, то это может вызвать выход емкости конденсатора за пределы, о которых сказано в технических условиях. Эту проблему можно решить, промыв плату растворителем, а затем поместив ее в посудомоечную машину.

Продолжайте писать ваши замечательные статьи по практическим вопросам, и мы все будем в выигрыше.

Ричард Т. Ламурё (Richard T. Lamoureux),
Хаусорн, Калифорния

Комментарий Пиза:

Вы проницательнее и опытнее меня. Спасибо вам за советы. Из написанного вами следует, что любой винтик на печатной плате, скорее всего, ослабнет, если только прибор не работает в проветриваемом помещении с постоянной температурой и при этом отсутствует заметный самонагрев. Может быть, может быть... Спасибо за советы.

RAP

Уважаемый Боб!

Мне очень понравился ваш последний цикл статей, посвященный поиску неисправностей.

Очень немногие могут оценить применяемые нами методы, требующие мастерства и усидчивости. Недавно я контролировал разработку некоторого устройства. Молодому разработчику, пришедшему прямо со студенческой скамьи, хватило *нескольких дней*, чтобы полностью завершить этап логического проектирования. А на доведение разработки до такого состояния, чтобы кому-нибудь можно было приступить к практическому созданию этого устройства (соответствующей печатной платы), у него в общей сложности ушло *несколько месяцев*. Этот инженер был поражен. Он ничего не знал о подобных вещах во время учебы. Ему еще надо было выбрать конструктив, компоненты (непростая задача) и все это *отладить*. Нечего и говорить, подобный опыт послужил отличным уроком для новичка. Даже для меня, опытного инженера-разработчика, это не совсем простая задача.

Я ожидаю худшего и всегда удивляюсь, когда хоть что-нибудь вдруг начинает функционировать. В результате я редко бываю разочарован. Создавая схемы, я постоянно помню об этом. (Аналогичная позиция рекомендована и в статьях Боба.)

Мне встречались многие люди с противоположным настроением: они надеются на лучшее и постоянно удивляются, когда что-нибудь не работает. Я плохо переношу общение с подобными людьми. Они либо гении (и мне довелось встретить двоих или троих таких за все годы, что я работаю в этой области), либо им никогда не приходилось доводить до конца разработку и отладку. Такая работа требует истинного смирения.

И еще об одном моменте, затронутом в статье Боба: люди постоянно удивляются, когда я говорю, что решаю большинство возникающих у меня проблем сидя

за рабочим столом с помощью омметра. Этот факт просто указывает на то, что в течение многих лет было причиной доброй половины проблем, – на контакты.

Джон Д. Луп (John D. Loop),
инженер-исследователь,
BellSouth, Атланта, Джорджия

Комментарий Пиза:

Я не очень часто использую омметр, но согласен с тем, что существует различные пути, позволяющие отыскать причину неисправности. Я думаю, что приблизительно половину возникающих у меня проблем мне удастся решать посредством чтения – изучения принципиальных схем, справочников, требований пользователя, технических описаний, результатов испытаний с описаниями условий проведения таких испытаний. Поэтому; на мой взгляд, можно было бы сказать, что половина проблем возникает в результате плохого обмена информацией.

RAP

Литература

Pease, Robert A., "Protection Circuit Cuts Voltage Loss", *Electronic Design*, June 14, 1990, с. 77.

14. РЕАЛЬНЫЕ СХЕМЫ – РЕАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Поздравляем вас! Вы стали счастливым обладателем совершенно нового автомобиля фирмы «Дрын-дрын». Он был построен по лучшим технологиям Старого света с использованием новейших методов компьютеризированного проектирования. Вас ожидают долгие мили беззаботной езды на этом автомобиле. Вам не о чем беспокоиться.

Когда возникнут какие-нибудь проблемы, ООО «Дрын-дрын Моторз» имеет честь предложить вам воспользоваться следующей таблицей поиска неисправностей:

Таблица поиска неисправностей

Проблема машина не заводится

Проявление неисправности	Решение
Пепельница заполнена	Выполните компьютерную процедуру «очистка пепельницы»
Указатель уровня топлива показывает «Пусто»	Залейте топливо
Топливо не поступает в двигатель	Замените компьютер, управляющий системой впрыска
Искра не воспламеняет топливо	Замените компьютер, управляющий системой зажигания
Дисплей на консоли показывает «Сбой процессора»	Отбуксируйте машину и доставьте сервисную книжку на ближайшую сервисную станцию авторизованного дилера «Дрын-дрын Моторз»

Конечно, приятно осознавать, что одна из пяти проблем может быть решена хозяином автомобиля самостоятельно. Однако я предпочитаю ездить на машине, неисправность которой может определить и устранить обыкновенный человек. Ну что же вы, давайте, спрашивайте, что за машина удовлетворяет этому описанию? У меня «Фольксваген-Жук» 1968 года выпуска. (У жены машина новее – 1969 года). Если он не заводится (что случается крайне редко), то я знаю, как искать причину отказа. Смотрю ли я в справочник? Да, смотрю, но не в книгу. Я смотрю в справочник, который у меня в голове. Что я делаю, если я подозреваю карбюратор или бензонасос? Заливаю чайную ложку бензина в карбюратор. Если зажигание

«схватывает», двигатель запускается, а потом глохнет, то понятно: я могу подать топливо, а карбюратор – нет. Теперь можно много чего сделать для того, чтобы подать топливо в двигатель, – поставить банку с бензином на крышу машины. Бензонасос не нужен. Мне не приходилось поступать подобным образом, но я видел, как кое-кто именно так и делал.

Если я подозреваю, что дело в искре, то у меня всегда достаточно запасных частей для того, чтобы я мог проверить искру, установку момента зажигания, заменить детали, повернуть распределитель и сделать все, что может потребоваться. Чтобы была возможность оказать помощь, когда на обочине трассы встречается сломанный Фольксваген, я держу запчасти в машине. У меня с собой есть даже конверт с моим адресом и маркой на случай, если я, пытаясь кому-то помочь, ничего не смогу сделать и даже понять, в чем проблема. Тогда я даю этому водителю конверт, чтобы он потом написал мне письмо с рассказом о том, в чем, собственно, заключалась неисправность.

В прошлом году я получил письмо от парня, только что купившего автобус Фольксваген 1970 года, который «сломался» у Бейшора (BayShore). В тот раз мы не смогли разобраться, что же в нем отказало. В письме он рассказал, что датчик топлива был сломан – всегда показывал 3/4 бака, и именно поэтому, когда у него кончилось топливо, он об этом не догадался. Предыдущий хозяин автобуса, к сожалению, оказался недостаточно любезным и не предупредил его об этой неисправности.

Так что если я и дальше буду ездить на этой примитивной машине, я буду знать о ней практически все.

(Ну давайте, скажите: «Хорошо, Пиз, ты не сможешь вечно ездить на «Фольксвагене» 1968 года». И будете не правы. Я могу купить столько этих машин, что мне их хватит еще на 50 лет. У нас, в Калифорнии, много «Жуков» 68-го года в очень хорошем состоянии...)

14.1. Вернемся к электронным схемам

Подобно ремонту автомобиля, который заключается в демонтаже больших неисправных модулей и установке вместо них исправных, в конструкции многих электронных схем и устройств используются ремонтпригодные только в заводских условиях сменные блоки, модули или платы. Даже те схемы, которые на самом деле отремонтировать очень просто, по привычке объявляются неремонтпригодными. Лично я категорически против подобного подхода. Несколько недель назад перестал работать небольшой переносной компьютер производства компании Compaq – тот самый, который я использую для работы с текстами. Я попытался прочитать техническую документацию на это устройство и найти инструкции по ремонту. Для поиска источника проблем в документации рекомендовалось проверить устройства компьютера с помощью различных сервисных программ. Абсолютно бессмысленный совет – электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) дисплея, как и все остальные системы, намертво не работала, так что у меня не было даже самой возможности воспользоваться этими диагностическими программами. К счастью, со мной работают два техника, которые не могут даже представить себе, что

значит «нельзя починить». Поль (Paul) залез внутрь и изучил внутренности компьютера, нашел пробитый выпрямитель, заменил его, и я снова смог «выйти в эфир». Если бы пришлось нести этот компьютер в специализированную мастерскую, то даже противно подумать о тех деньгах, которые пришлось бы заплатить, и о времени ожидания, которое требовалось для замены простого выпрямителя ценой \$2. Я думаю, что весь блок питания обошелся бы в \$90, и это не считая работы.

Когда в прошлом году я странствовал по Катманду, я видел людей, занятых починкой того, на что в США не стали бы тратить время. Однако непальцам не хватает денег для вступление в общество «выбрасывателей» или «одноразовости», поэтому им приходится тратить силы на ремонт своего имущества. Автомобили, одежда, кухонные плиты, инструменты – все, что можно попробовать починить, обычно ремонтируется. (А если починить ту или иную вещь не удастся, она часто используется для других целей.) Такой подход мне по душе, и я обычно предпочитаю потратить на попытки отремонтировать устройство больше времени, чем могло бы оправдать стоимость его замены. Почему? А потому, что иногда мне удастся узнать что-то новое.

Одно время я ездил на Фольксвагене 1970 года выпуска, который я отправил на заслуженный отдых: на спидометре у него было около 400 000 км и сильно текло масло. Когда я приступил непосредственно к разборке двигателя, то обнаружил полностью развинтившиеся болты крепления масляного радиатора. А почему они отвинтились? Потому что на гайках не было стопорных шайб. После этого случая, чтобы минимизировать опасность ослабления гаек или болтов, я всегда проверял каждого, кто работает с двигателем моей машины, настаивая на обязательном использовании стопорных шайб. Эксперимент по разборке двигателя оказался очень познавательным и вполне стоил затраченных на него времени и сил.

Так что давайте договоримся, что мы предпочтем поискать неисправность и исправить ее, вместо того чтобы просто выкинуть устройство или плату. Как-то я разговаривал с одним парнем и он сказал: «Боб, обязательно различай поиск неисправностей в лаборатории и поиск неисправностей в серийном производстве». Я не думаю, что понимаю, в чем разница. Наверняка это может оказаться очень полезным, и, потратив немного времени и денег, вы приобретете бесценный опыт. В дру-

гих случаях, безусловно, можно потратить много часов и забрести неизвестно куда.

Как и в любой другой области, поиск неисправностей – это мастерство, владение которым растет вместе с опытом. Нужно изучить режимы и варианты отказов, причины и последовательность перегрузок, порядок действий при замене вышедших из строя деталей, документацию и все-все, о чем написано выше. А как же насчет «Что делать?» Давайте посмотрим на таблицу поиска неисправностей в простой схеме инвертирующего усилителя на ОУ (рис.14.1).

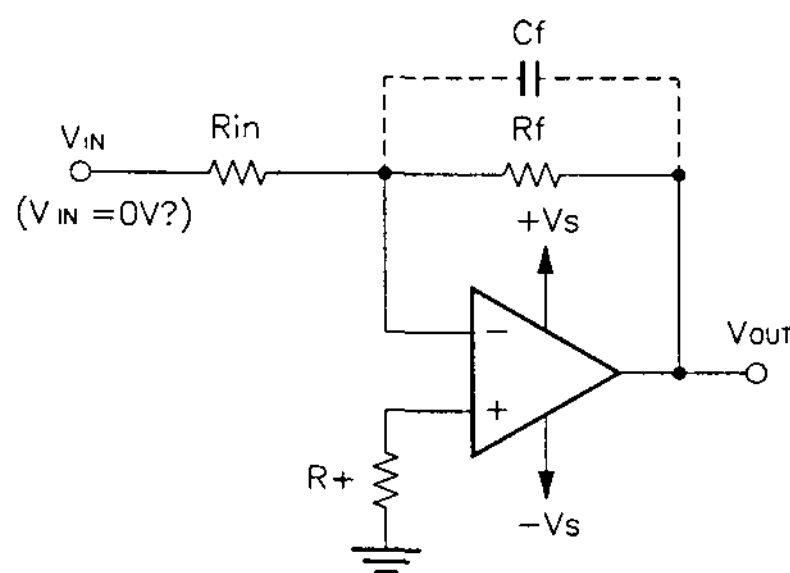


Рис. 14.1. Простейший инвертирующий усилитель на ОУ

Таблица 14.1. Устранение неисправностей в инвертирующих усилителях на ОУ

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Чрезмерное смещение нуля выходного напряжения (при нулевом входном сигнале)	Слишком большое сопротивление резистора R_f обратной связи	Установите R_f с меньшим сопротивлением либо используйте операционный усилитель более высокого качества, с меньшим I_b
	Смещение вызвано самовозбуждением	Проверьте с помощью осциллографа, нет ли самовозбуждения
	Наличие утечек на входах	Убедитесь, что на печатной плате нет загрязнений и «текущих» участков или разъемов
	Неправильно выбрано сопротивление резистора R_+ Слишком большое напряжение V_{os} операционного усилителя	Сделайте так, чтобы $R_+ = R_{in} \parallel R_f$ V_{out} должно быть $< V_{os} \times [(R_f/R_{in})+1]$. Для снижения V_{os} используйте потенциометр подстройки нуля либо операционный усилитель более высокого качества
Уровень выходного сигнала мало отличается от уровня одной из шин питания	Характеристики усилителя не соответствуют технической документации Возможно, не подключена вторая шина питания	Если вышеперечисленные причины не подходят, демонтируйте и проверьте операционный усилитель Проверьте напряжение на всех выводах корпуса операционного усилителя, а не только на печатной плате
	Короткое замыкание выхода на одну из шин питания	Проверить, не перегрет ли операционный усилитель.
В выходном сигнале присутствуют колебания	Дефектный операционный усилитель	Проверить выходные цепи Демонтировать и проверить по всем параметрам операционный усилитель
	Колебания во входном сигнале	Проверить входной сигнал
	Колебания или пульсации на шинах питания	Проверить обе шины питания
	Фильтрующие и развязывающие по питанию конденсаторы отсутствуют или неподходящего типа Емкостная составляющая в нагрузке слишком велика Отсутствует конденсатор в цепи обратной связи Колебания в эфире (мощные радиосигналы) Емкость корректирующего конденсатора слишком мала (у LM301A и аналогов) Колебания на выходе усилителя то появляются, то исчезают	Попробуйте установить больше конденсаторов, примените конденсаторы более высокого качества, расположите их ближе к корпусу операционного усилителя Проверьте кабели, измерьте емкостную составляющую сопротивления нагрузки См. в тексте. Попробуйте различные емкости C_f Отключите питание и проверьте наличие колебаний Попробуйте увеличить корректирующую емкость
Выходной сигнал искажен	Слишком низкоомная нагрузка	Проверьте выходной сигнал на наличие «звона» (см. в главе 8 раздел «Принцип Пиза»)
	Искажен входной сигнал Искажена скорость нарастания выходного напряжения	Проверьте активную и реактивную составляющие сопротивления нагрузки Проверьте форму входного сигнала Проверьте работу схемы при входном сигнале меньшей частоты или амплитуды

Таблица 14.1. Устранение неисправностей в инвертирующих усилителях на ОУ (окончание)

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
	У резисторов в цепи обратной связи недостаточно высокий класс точности, или их сопротивление не соответствует заданным значениям	Проверьте номиналы и класс точности использованных резисторов
Ошибочный коэффициент усиления	Склонность к самовозбуждению на определенных уровнях	Проверьте схему на самовозбуждение во всем диапазоне выходного напряжения Замените усилитель на исправный
Особые симптомы	Позднение на неисправность усилителя	
	После замены схема все равно не работает	Установите усилитель в исправную схему или макет
Нет выходного сигнала (напряжение выходного сигнала равно 0 В)	Выход имеет короткое замыкание на общий провод	Усилитель нагревается. Выключите питание, измерьте сопротивления
	У усилителя малое напряжение V_{os} (операционный усилитель очень высокого качества)	Подайте небольшое напряжение на резистор R_+ . Посмотрите, не изменится ли уровень выходного сигнала
И т.д.		

А теперь скажите, что в этой таблице самое ценное? То, что с ее помощью можно справиться с любой проблемой, возникшей при работе операционного усилителя? Нет, черт возьми! Вы, несомненно, можете столкнуться с такими схемами и неисправностями, которых я никогда не встречал и не могу себе даже вообразить, – для ремонта таких схем необходима более подробная информация, чем та, которую можно извлечь из приведенной выше таблицы.

Ну, хорошо, может, самое ценное – это то, что таблица дает общие подходы к решению, которые применимы для каждой схемы? Отличная идея, которая, несомненно, обладает определенной ценностью, но и это не самое важное.

Итак, что же все-таки самое важное в этой таблице? А самое важное в ней то, что вы можете составить собственную таблицу поиска неисправностей. Для этого не надо быть гением, обладать выдающимися способностями и непогрешимостью. Вам не нужно тщательно все записывать. Вам не придется составлять план действий и шаг за шагом в точности ему следовать. Вам даже не придется записывать свои планы, хотя обычно это оказывается полезным мероприятием. Вам не придется ничего делать. Понадобится только время от времени задумываться. Если вы немного подумаете, то сможете предложить такие решения проблем, контрольные проверки и ответы, до которых я вовек бы не додумался. У вас есть ваши собственные системы, в которых вы отлично разбираетесь, имеется оборудование, есть друзья. Объединив все это, можно решить проблемы, с которыми, кроме вас, не справится никто. Так что, как мне думается, очень полезна была бы некоторая степень уверенности. А если вы знаете какие-то особые методы, то еще лучше. Я никогда не говорил вам, что я знаю все. Однако готов поспорить, что некоторые из изложенных в этой книге методов вам пригодятся.

Ниже я предлагаю еще несколько сценариев поиска неисправностей в основополагающих канонических схемах. Вероятно, вам встретятся задачи, которые с их помощью решить не удастся, но они помогут осмыслить ситуацию и решить сложные проблемы, возникающие при работе с электронными схемами.

Итак, примеры:

- однотранзисторный усилитель;
- стабилизатор отрицательного напряжения (с микросхемой LM337);
- схема определения абсолютной величины;
- импульсный стабилизатор на микросхеме LM3524;
- стабилизатор положительного напряжения (с микросхемой LM317);
- стабилизатор на микросхеме типа 723;
- инструментальный усилитель;
- импульсный стабилизатор на микросхеме LM2575.

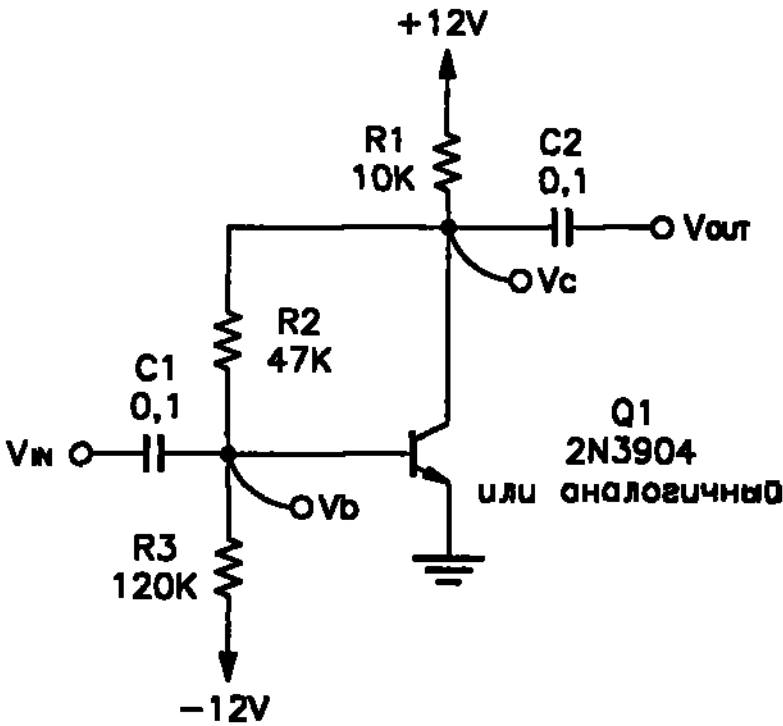


Рис. 14.2. Простейший однотранзисторный усилитель

Таблица 14.2. Устранение неисправностей однотранзисторных усилителей (рис. 14.2)

Проявление неисправности	Вероятные причины	Рекомендуемые действия
Ненормальный уровень постоянного напряжения на выходе усилителя		
Напряжение на коллекторе транзистора равно +12 В	Резистор R2 поврежден или отсутствует	Проверить сопротивления и напряжения. Кратковременно подключить параллельно резистору R2 резистор сопротивлением 47 кОм
	Короткое замыкание резистора R3	Проверить печатные проводники или другой монтаж на короткое замыкание
	Короткое замыкание резистора R1	Проверить печатные проводники или другой монтаж на короткое замыкание
Напряжение на коллекторе равно +10 В	База транзистора Q1 замкнута на «землю»	Измерить напряжение на базе
Напряжение на коллекторе равно +0,7 В	Обрыв в цепи коллектора транзистора Q1	Проверить коллекторный переход
	Резистор R3 поврежден, отсутствует или в его цепи произошел обрыв	Проверить резистор. Кратковременно подключить параллельно R3 резистор сопротивлением 120 кОм
	Сопротивление резисторов R1 или R2 не соответствует заданным значениям	Проверить резисторы
Напряжение на коллекторе равно 0 В	Пробой перехода коллектор-база со смыканием	Проверить печатный или иной монтаж, а также сам транзистор на короткие замыкания
	Коллектор замкнут на землю	Проверить печатный или иной монтаж, а также сам транзистор на короткие замыкания

Таблица 14.2. Устранение неисправностей одностранзисторных усилителей (окончание)

Проявление неисправности	Вероятные причины	Рекомендуемые действия
Ненормальная величина напряжения на базе		
Напряжение на базе равно +3 В	Плохо пропаяны соединения	Убедиться в том, что выводы базы и коллектора действительно подключены к схеме
	Вероятно, выгорел переход база-эмиттер Использован PNP-транзистор	Заменить транзистор Q1
Напряжение на базе равно –3 В	Сопротивления резисторов не соответствуют заданным значениям	Проверить всю схему два или даже три раза
	Слишком мощный входной сигнал	Проверить сопротивление резисторов
Усиление отсутствует или не соответствует заданному	Конденсатор отсутствует или его емкость слишком мала	Проверить сигнал осциллографом
	Неправильно выбраны режим и смещение	Установить добавочный высококачественный конденсатор параллельно C1 или C2
Колебания на выходе	Транзистор Q1 установлен неверно	Проверить уровни постоянного тока, как было указано выше
	Общие	Проверить распайку выводов транзистора
Малое усиление (не инвертирующее)	Есть колебания или пульсации по питанию	Определить частоту колебаний
	Есть колебания в нагрузке	Проверить питание, добавить фильтры
И т.д.	При подключении нагрузки возникают колебания на Q1	Замкнуть базу транзистора Q1 на землю, проверить коллектор
	Поврежден транзистор	Отключить нагрузку и проверить ее параметры
	Установлен PNP-транзистор	Проверить, как указано выше
		Проверить тип транзистора

Комментарии к таблице устранения неисправностей одностранзисторных усилителей

У этой цепи много общих черт с большим количеством схем, использующих транзисторы. Она как нельзя лучше подходит для того, чтобы оттачивать навыки поиска неисправностей. Цифровой вольтметр не совсем бесполезен, однако работать с осциллографом гораздо удобнее.

Теперь давайте перейдем к регулируемому стабилизатору положительного напряжения.

Комментарии к таблице устранения неисправностей стабилизаторов на базе микросхемы LM317

Интегральный стабилизатор LM317 обычно очень прост и понятен в применении, но если забыть о некоторых пунктах, указанных в этой таблице, могут возникнуть трудности. В таблице перечислена большая часть проблем, с которыми к нам обращались клиенты. Для микросхем LM350, LM338 и LM396, безусловно, подходит представленная здесь основная схема, которую можно использовать для конкретных

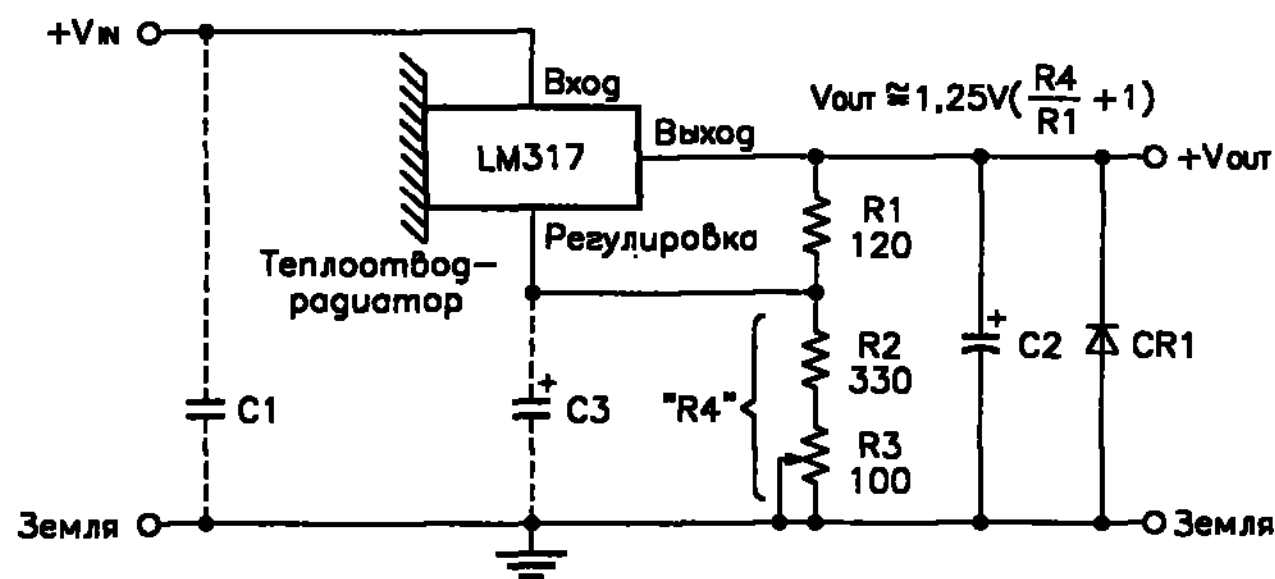


Рис. 14.3. Регулируемый стабилизатор положительного напряжения

Таблица 14.3. Устранение неисправностей регулируемых стабилизаторов положительного напряжения

Проявление неисправности	Вероятные причины	Рекомендуемые действия
Уровень выходного напряжения слишком малый	Слишком малый уровень входного напряжения	Проверить входное напряжение с помощью осциллографа
	Короткое замыкание резисторов R2 или R3	Проверить резисторы
Выходное напряжение слишком высокое	Конденсатор C3 пробит или переполюсован	Проверить или переставить конденсатор C3
	Слишком низкоомная нагрузка или короткое замыкание в нагрузке	Устройство нагревается. Попробуйте отключить нагрузку
	Диод CR1 пробит или переполюсован	Проверить диод
	Конденсатор C2 пробит или переполюсован	Проверить или переставить конденсатор C2
	Утечки по выводу РЕГУЛИРОВКА	Проверить плату на наличие загрязнений
Колебания в выходном сигнале	Выходное напряжение равно 0,8 В	Выход замкнут на вход
	Обрыв в цепи движка потенциометра	Проверить напряжение на выводах потенциометра
	Сопротивление резистора R1 слишком мало	Проверить значение
Слишком высокий уровень шумов в выходном сигнале	Слишком высокое входное напряжение	Проверить с помощью осциллографа
	Утечка на выводе РЕГУЛИРОВКА	Проверить плату на наличие загрязнений
Слишком высокий уровень шумов в выходном сигнале	Общие	Определить частоту колебаний
	Проверить конденсатор C1	Емкость C1 должна быть не менее 0,1 мкФ. См. техническую документацию
Слишком высокий уровень шумов в выходном сигнале	Слишком сильные колебания нагрузки	Значительно увеличить емкость конденсатора C2 и подобрать оптимальное значение емкости
	Слишком высокий уровень шумов в входном сигнале	Изучить шумы во входном сигнале. Увеличить емкость конденсаторов C1, C2 или C3
Слишком высокий уровень шумов в выходном сигнале	Слишком высокий уровень шумов в нагрузке, либо ее уровень чересчур нестабилен	Увеличить емкость конденсатора C2 и подобрать оптимальное значение.
		Аналогичным образом проверить конденсаторы C1 или C3

Таблица 14.3. Устранение неисправностей регулируемых стабилизаторов положительного напряжения (окончание)

Проявление неисправности	Вероятные причины	Рекомендуемые действия
	Слишком высокий уровень шумов в нагрузке, либо ее уровень чересчур нестабилен	Увеличить емкость конденсатора C2 и подобрать оптимальное значение. Аналогичным образом проверить конденсаторы C1 или C3
Выходной сигнал «плавает», не поддается регулировке	Устройство сильно перегрето	Установить дополнительные теплоотводы или радиаторы. Помните: рассеяние = $(I_{\text{нагрузки}}) \times (V_{\text{in}} - V_{\text{out}})$
Сильные колебания выходного напряжения при изменении тока $I_{\text{нагрузки}}$	Резистор R1 подключен слишком близко к нагрузке (неудачное подключение Кельвина)	Подключить R1 непосредственно к выводу LM317 (нельзя использовать тот же провод, что и для подключения нагрузки)
	Подключение нагрузки вызывает осцилляцию	Проконтролируйте состояние цепи при подключении различных вариантов нагрузки. Попробуйте воспользоваться принципом Пиза
Ни один из приведенных выше советов не помог решить проблему И т.д.	Один из элементов неисправен	Замените стабилизатор

моделей. Однако не забывайте, что расположение выводов у микросхемы LM396 не такое, как у остальных перечисленных интегральных микросхем!

Часть положений этой таблицы применима к интегральным стабилизаторам с фиксированным уровнем выходного напряжения, таким как широко используемые семейства микросхем LM340 и LM7800. Выпускаются модификации на 5 В, 12 В и 15 В и др.

Если вы много работаете со схемами, подобными рассмотренной, то стоит приобрести небольшую макетную плату с панелькой, на которой можно проверять, где скрыт дефект интегральной микросхемы: в самой схеме или во внешних цепях. При проведении подобной проверки помните о том, что если не используется высококачественная панелька со схемой Кельвина, то, возможно, коэффициент стабилизации выходного напряжения по нагрузке ниже среднего уровня. Кроме того, если не установлен радиатор, то устройство, наверняка будет быстро нагреваться.

Теперь обратимся к стабилизатору отрицательного напряжения, практически не отличающемуся от стабилизатора положительного напряжения. Так что мы добавим в таблицу только те разделы, которых нет в табл. 14.3.

Комментарии к таблице устранения неисправностей стабилизаторов отрицательного напряжения

Эти стабилизаторы обладают практически теми же достоинствами и почти так же не подвержены неприятностям, как и стабилизаторы постоянного напряжения, за

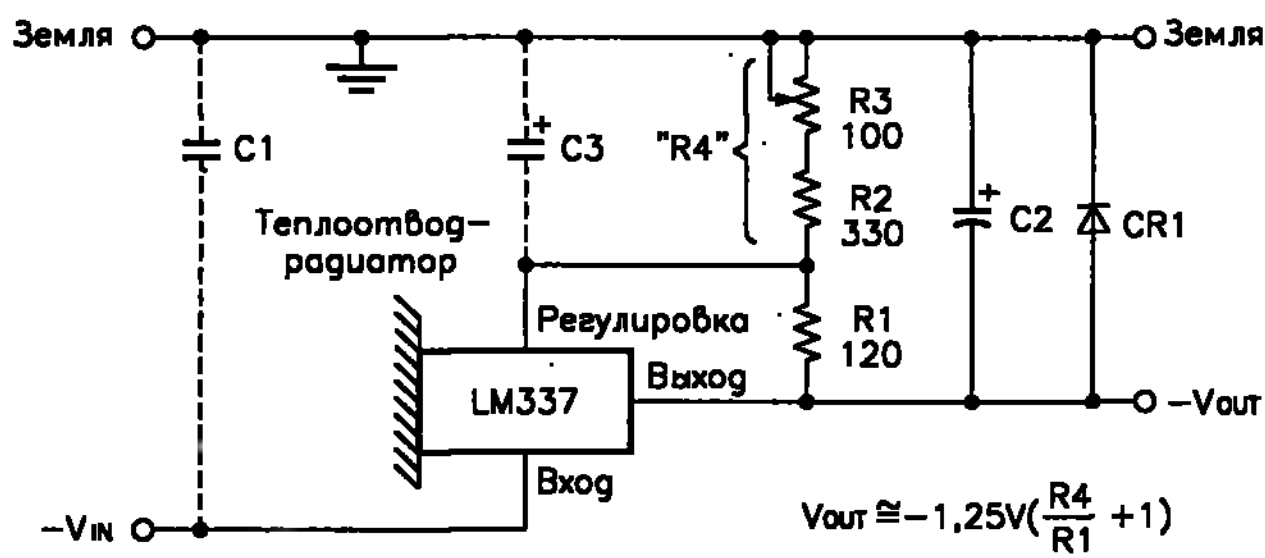


Рис. 14.4. Регулируемый стабилизатор отрицательного напряжения

Таблица 14.4. Устранение неисправностей стабилизаторов отрицательного напряжения (регулируемых)

Проявление неисправности	Вероятные причины	Рекомендуемые действия
Значительные отклонения по постоянному току	См. приведенную выше таблицу для стабилизаторов положительного напряжения	
Колебания	См. приведенную выше таблицу для стабилизаторов положительного напряжения. См. ниже Параметры конденсатора C2 не соответствуют заданным К выходной шине подключено слишком много керамических дисковых конденсаторов	См. фирменную техническую документацию. Избегайте использования керамических и пленочных конденсаторов. Используйте танталовые или электролитические конденсаторы большой емкости «Затопите» дисковые конденсаторы посредством перекомпенсации, установив танталовый конденсатор емкостью в десятки микрофард или алюминиевый электролитический, емкостью в несколько сотен микрофард

одним исключением: для нормальной работы этих устройств необходима установка, как было сказано выше, высококачественного конденсатора между выходом и землей.

Для работы стабилизаторов отрицательного напряжения с фиксированным уровнем выходного напряжения (семейства микросхем LM320 и LM7900) требуется высококачественный конденсатор для демпфирования в выходной цепи. Это обязательное условие для того, чтобы скомпенсировать излишнее усиление на высоких частотах, так как у всех стабилизаторов отрицательного напряжения используются регулирующие транзисторы по схеме с общим эмиттером и нагрузка включается в цепь коллектора.

Комментарии к таблице устранения неисправностей стабилизаторов типа LM723

Как можно убедиться, эти стабилизаторы – потенциальная причина многих проблем. В настоящее время микросхема LM723 используют редко, если только ее

применение не вызвано какими-нибудь особенными требованиями. Не хочу никого пугать, но каждому, кто должен отремонтировать несколько стабилизаторов устаревших моделей, необходимо детально разбираться с тем, как работает схема. Тогда, чтобы определить, верно ли выбранное направление или нет, достаточно проверить напряжение в паре мест. Концепции построения схемы должны быть непосредственно в голове, а иначе никогда не закончить ремонт всех отказавших модулей.

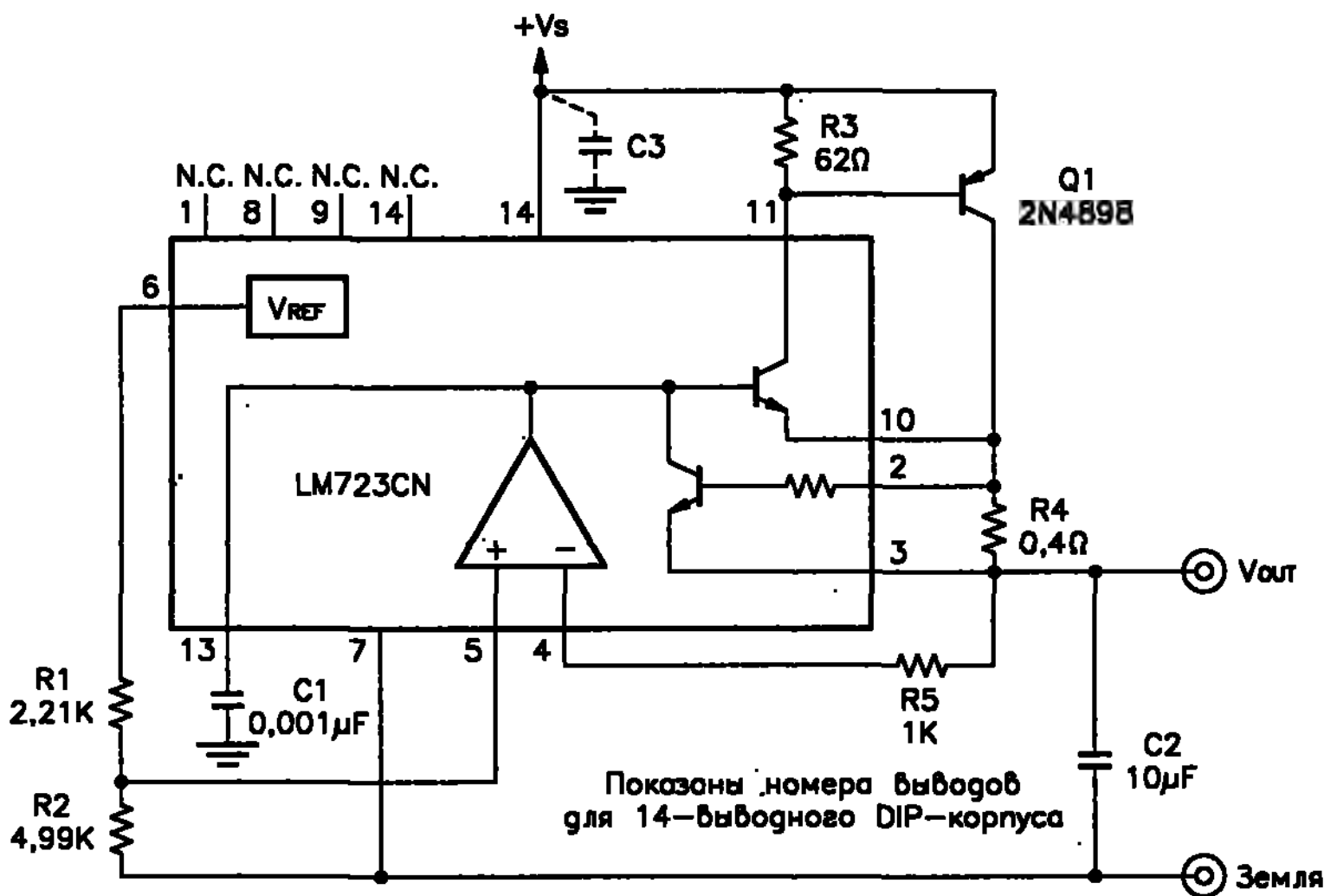


Рис. 14.5. Стабилизатор типа LM723

Таблица 14.5. Устранение неисправностей стабилизаторов типа LM723

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Незначительная погрешность выходного напряжения	Проблемы с резисторами Колебания Неисправен источник опорного напряжения Неисправен усилитель ошибки	Проверить резисторы R1, R2 Проверить на наличие колебаний Проверить напряжение на выводе 6 Проверить напряжение на выводах 4, 5 микросхемы
Выходное напряжение слишком низкое	Проблемы с резисторами Неисправен источник опорного напряжения Замыкание в корректирующем конденсаторе Транзистор Q1 вышел из строя Резистор R4 вышел из строя Слишком низкоомная нагрузка	Проверить резисторы R1, R2. Проверить напряжение на выводах 6, 5, 4, 3 микросхемы Проверить напряжение на выводе 6 микросхемы Проверить напряжение и сопротивление на контакте 13 Проверить напряжение на выводах 12, 11 микросхемы. Демонтировать и заменить транзистор Q1 Проверить сопротивление резистора R4 Измерить напряжение на резисторе R4. Отключить нагрузку

Таблица 14.5. Устранение неисправностей стабилизаторов типа LM723 (окончание)

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Выходное напряжение слишком высокое	Слишком низкий уровень входного сигнала	Измерить V_{in} с помощью осциллографа
	В проводниках печатной платы короткое замыкание	См. выше
	Обрыв в проводниках печатной платы	См. выше
Мощности выходного сигнала не хватает для питания номинальной нагрузки	Неисправна LM723	См. выше. Проверить, заменить
	Аналогично сказанному выше	Аналогично сказанному выше
	Короткое замыкание в транзисторе Q1	Проверить напряжение между выводами 11 и 12 микросхемы. Если напряжение отсутствует, то, значит, транзистор не работает
Ток короткого замыкания у цепи слишком велик. Значительная неустойчивость выходного напряжения или тока по нагрузке	Напряжение входного сигнала слишком высокое	Проверить V_{in} с помощью осциллографа
	Использован резистор R4 не того номинала	Измерить параметры резистора R4
	Транзистор Q1 вышел из строя	Проверить и заменить транзистор Q1
Колебания	Какая-то неясная неисправность	Заново проверить все, о чем говорилось выше
	Неисправен ограничитель тока	Проверить напряжение на выводах 2, 3 микросхемы. Проверить резистор R4. Заменить интегральную микросхему 723
	Колебания	Проверить на наличие колебаний
Шум в выходном сигнале	Плохой коэффициент усиления у транзистора Q1	Проверить и заменить транзистор Q1
	Во всех случаях:	Выяснить частоту колебаний
	Неисправен конденсатор C1	Добавить параллельно C1 конденсатор емкостью 0,001
При подключении полной нагрузки транзистор Q1 выходит из строя	Необходимо добавить конденсатор C2	Попробуйте установить параллельно C2 конденсаторы различной емкости, от 10 до 500 мкФ
	Необходимо добавить конденсатор C3	Попробуйте в качестве C3 использовать конденсаторы емкостью 0,1 и/или 100 мкФ. Попробуйте подключить C2 и C3, одновременно увеличив емкость C1
	Транзистор Q1 медленно срабатывает	Попробуйте использовать транзистор другого типа
И т.д.	Входной сигнал зашумлен	Проверьте входной сигнал с помощью осциллографа
	Шумы на источнике опорного напряжения	Проверьте сигнал на выводе 6 с помощью осциллографа, подключите полиэтилентерефталатный конденсатор емкостью 0,1 или 1 мкФ к выводу 5
	Недостаточный отвод тепла	Попробуйте установить радиатор большей площади
	Болты крепления радиатора затянуты слишком туго или слишком слабо	Проверьте крепления
	Колебания	Проверьте на наличие колебаний
	Избыточная мощность	Посчитайте мощность: $I_L \times (V_{in} - V_{out})$

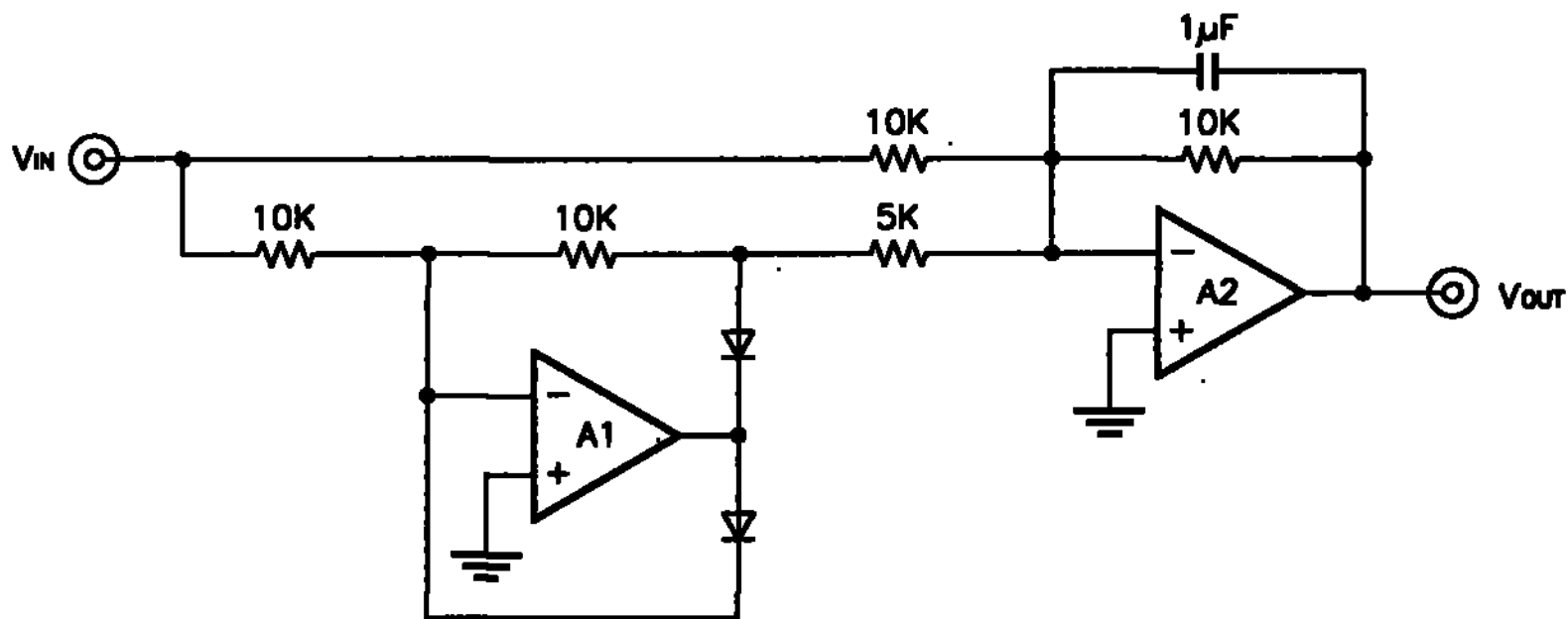


Рис. 14.6. Двухполупериодный выпрямитель

Таблица 14.6. Устранение неисправностей двухполупериодных выпрямителей

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Плохо работает входной усилитель	Что угодно	Подайте постоянный ток напряжением V_{in} от +0,1 до +10 В и устраните неисправность в соответствии с изложенной выше процедурой ремонта инвертирующего операционного усилителя
Плохо работает выходной усилитель	Что угодно	Подайте постоянный ток напряжением V_{in} от −0,1 до −10 В и устраните неисправность в соответствии с изложенной выше процедурой ремонта инвертирующего операционного усилителя
	Дефектные диоды	Проверьте диоды на подключение в обратной полярности и короткое замыкание. Контролируйте выход A1 с помощью осциллографа
Медленный отклик по переменному току	Слишком медленные диоды	Проверьте диоды, используя низкопрофильные панельки. Сравните с исправными экземплярами
	Слишком медленный усилитель	Проверьте усилитель, подавая на него сигналы переменного тока с большой и маленькой амплитудой, высокочастотные и низкочастотные
Сильные погрешности по постоянному току	Слишком большая утечка на диодах	Сравните результаты измерения утечки с параметрами высококачественных диодов

Комментарии к таблице устранения неисправностей двухполупериодных выпрямителей

Если необходимо перейти к производству какой-нибудь сложной схемы, то, как и для других сложных схем, нужно подготовить макетную схему с панельками для всех важных элементов. С помощью этих панелек легко проверять, сравнивать схемы, меняя элементы, и тратить на это совсем немного времени. Иной подход может привести к тому, что вы только усугубите проблему, а это неправильно.

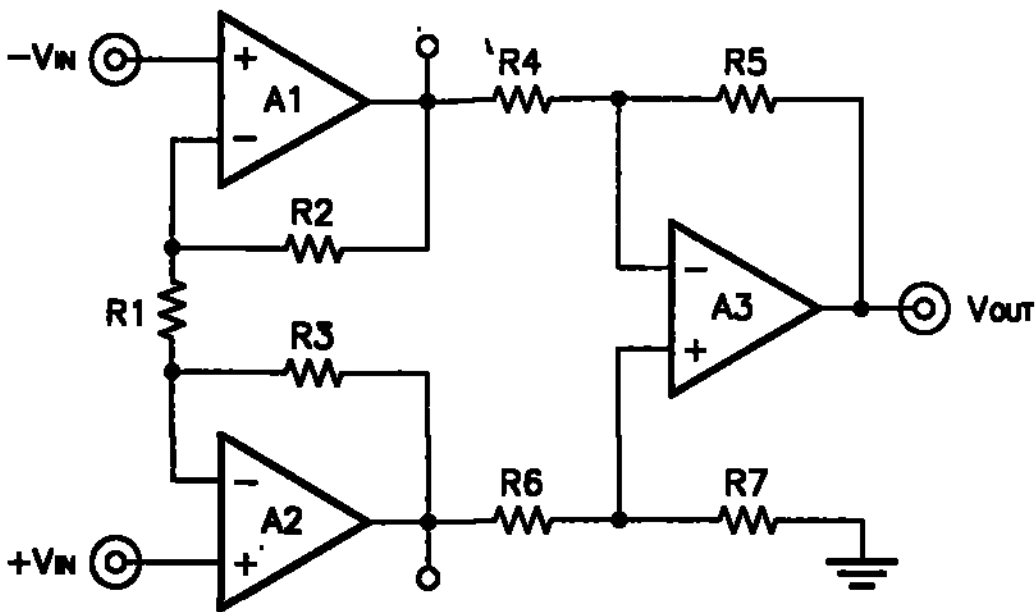


Рис. 14.7. Инструментальный усилитель

Таблица 14.7. Устранение неисправностей инструментальных усилителей

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Входной каскад плохо работает	Что угодно	Заземлите один входной вывод и подайте сигнал на второй. Поиск неисправностей проводится так же, как для инвертирующего усилителя. После этого поменяйте входные выводы местами
	Неисправен выходной каскад	Заземлите один вход выходного каскада и подайте сигнал на второй. Проведите поиск неисправностей, как показано выше
Значительная погрешность по постоянному току Ошибка в коэффициенте ослабления синфазного сигнала	Что угодно	Заземлите оба входа. Измерьте напряжение во всех точках с помощью цифрового вольтметра и проведите тестирование
	Входной каскад	Соедините оба входных вывода и подайте на них + и -. Измерьте напряжение во всех точках. Проверьте коэффициент ослабления синфазного сигнала у входного операционного усилителя
	Выходной каскад	Проверьте согласованность резисторов и диапазон настройки. Проверьте выходной сигнал операционного усилителя

Комментарии к таблице устранения неисправностей инструментальных усилителей

Как и в предыдущем примере, чтобы было проще оценивать параметры элементов, эту схему следует настраивать с помощью панелек. При такой настройке повышается уровень взаимовлияния, но, по правде говоря, это не самое трудное, когда нужно разобраться, что же именно происходит неправильно.

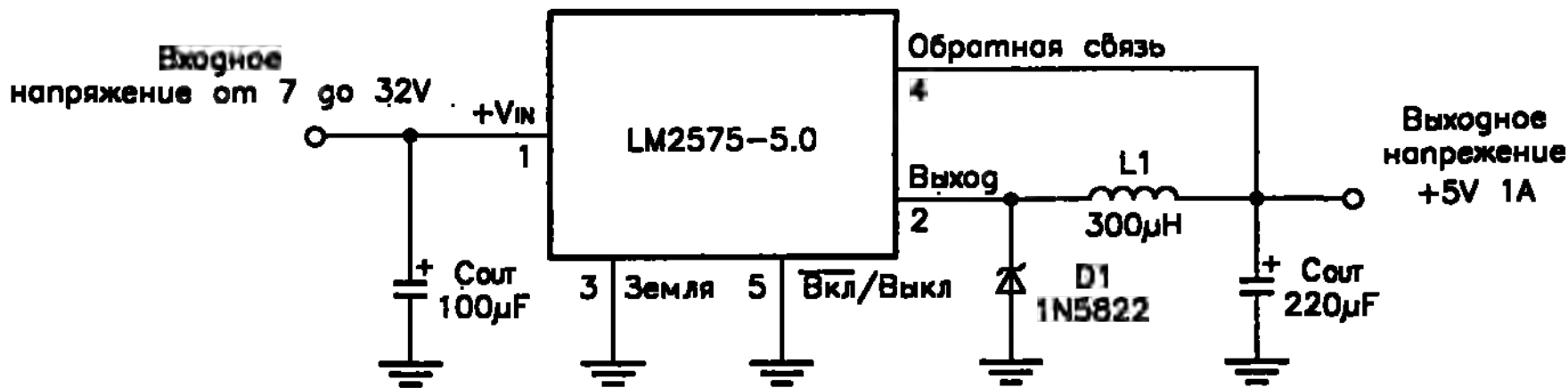


Рис. 14.8. Импульсный стабилизатор на микросхеме LM2575

Примечание к рис. Номера выводов указаны для корпуса типа TO-220.

Таблица 14.8. Исправление дефектов импульсных стабилизаторов на базе микросхемы LM2575

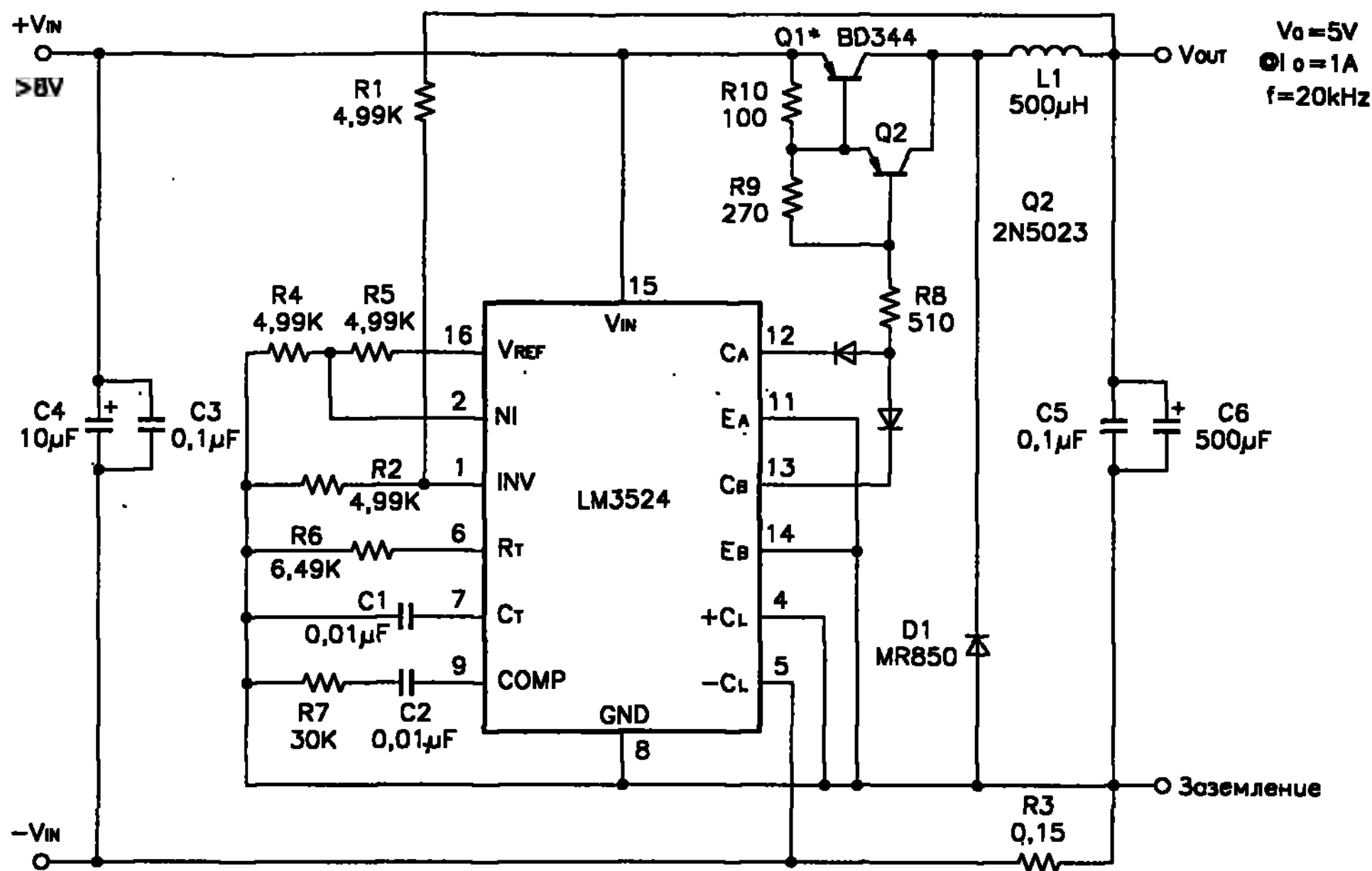
Проявление неисправности	Возможные причины	Предлагаемые действия
Слишком низкое напряжение выходного сигнала	Слишком низкое входное напряжение Замыкание в нагрузке или перегрузка стабилизатора Вывод Вкл/Выкл разомкнут Неисправен выпрямительный диод Неисправна интегральная микросхема	Проверьте V_{in} с помощью осциллографа Отключите нагрузку. Измерьте сопротивление между выходом и землей Проверьте напряжение на выводе 5 Проверьте напряжение на диоде D1 и его сопротивление Проверьте, переставьте, замените
Слишком высокое напряжение выходного сигнала	Слишком высокая температура окружающей среды	Проверьте температуру, обеспечьте охлаждение
Перегрев катушки индуктивности	Сбой в цепи обратной связи Неисправен дроссель	Проверьте напряжение на выводе 4 Проверьте, замените
	Слишком высокая частота	Проверьте частоту на выводе 2
	Неисправен дроссель	Проверьте дроссель L, сравните уровни потерь на этом дросселе и на исправном Проверьте выпрямительный диод
Перегрев интегральной схемы	Короткое замыкание в выпрямительном диоде Слишком высокая частота Короткое замыкание выхода	Проверьте частоту на выводе 2 Проверьте $V_{\text{выходное}}$, $I_{\text{нагрузки}}$, $I_{\text{питания}}$
Перегрев выпрямителя	Слишком высокая частота	Проверьте частоту на выводе 2
Сильная пульсация	Слишком медленный диод Ошибочная частота Неисправен конденсатор Ошибочная форма колебаний	Сравните диод с исправным Проверьте частоту на выводе 2 Проверьте R_s конденсаторов Проверьте формы сигналов
И т.д.		

Комментарии к таблице исправления дефектов импульсных стабилизаторов на базе микросхемы LM2575

Несмотря на то что на первый взгляд эта схема выглядит очень простой – в ней всего нескольких деталей, необходимо позаботиться, чтобы под руками была макетная плата (с панельками), так как силовой дроссель – очень капризный и непростой компонент.

Комментарии к таблице исправления дефектов импульсного стабилизатора на базе микросхемы LM3524

При возникновении проблем со схемой такой сложности, для их решения потребуются такие же глубокие знания, как и у разработчика схемы. (А может быть, даже более глубокие?) Кроме того, потребуется запомнить, как правильно должны выглядеть формы сигналов, это позволит выявлять ошибки и отклонения. Понадобится компактная макетная плата, с помощью которой можно проверять характеристики установленных в панельки важнейших компонентов схемы. В любой выборочной партии плохо работающих устройств встречаются различные



* Монтируется на теплоотводе-радиаторе компании Staver No V5-1

Рис. 14.9. Импульсный стабилизатор на интегральной микросхеме LM3524

Таблица 14.9. Устранение неисправностей импульсных стабилизаторов на интегральной микросхеме LM3524. Упрощенный вариант

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Наблюдается перегрев одного или нескольких элементов	Слишком высокая частота Неисправен выпрямитель D1 Неисправны транзисторы Неисправен конденсатор Неисправен LM3524	Измерьте F на выводе 7 Проверьте D1 Проверьте транзисторы Проверьте конденсатор Проверьте LM3524
Неточно задана тактовая частота	Неисправен конденсатор	Проверьте Ct на выводе 7
Неустойчивое состояние цепи	Неисправен резистор Неисправен RC-демпфер	Проверьте Rt на выводе 6 Проверьте RC-цепочку на выводе 9
	Неисправно C6 Неисправная катушка индуктивности	Замените на исправное Проверьте L1
Не работает цепь ограничения тока	Неисправен R _{sense}	Проверьте R _{sense} на выводах 4, 5
Отклонение выходного напряжения не соответствует допускам	Неисправны резисторы Неисправен источник опорного напряжения Неисправны резисторы Неисправна катушка индуктивности	Проверьте R1, 2, 4, 5 Проверьте напряжение на выводах 16, 2, 1 Проверьте R8, 9, 10 Проверьте L1
Перегреваются транзисторы		
Устройство не работает	Есть замыкания, вызванные каплями припоя	Проверьте плату на наличие капель припоя

Таблица 14.9. Устранение неисправностей импульсных стабилизаторов на интегральной микросхеме LM3524. Упрощенный вариант (окончание)

Проявление неисправности	Возможная причина	Рекомендуемые действия
Мощности недостаточно для питания номинальной нагрузки	Неисправен один из элементов	Проверьте все элементы
	Неисправен транзистор	Проверьте Q1, Q2. Замените на исправные экземпляры
	Входное напряжение не соответствует спецификациям	Проверьте V_{in} с помощью осциллографа
	Неисправна интегральная схема 3524	Изучите все данные, замените на исправный экземпляр
И т.д.		

причины отказов, поэтому, если придется ремонтировать много схем, вы можете стать классным специалистом по поиску и исправлению неисправностей.

Замечание: эта схема создана на основе той, что изображена на рис. 15 из технического описания 1989 года на интегральную схему LM3524 корпорации National Semiconductor. Схема, представленная в техническом описании, не работает, так как диоды, подключенные к выводам 12 и 13, изображены на ней в противоположном направлении... мы очень об этом сожалеем. Я заметил это еще до того, как начал разрабатывать схему, изображенную здесь. Затем я собрал устройство по приводимой здесь схеме. Оно отлично функционировало. Как бы то ни было, теперь вы знаете, почему микросхемы LM2575 называют «простым ИСН» в сравнении со старыми микросхемами типа описанной здесь.

14.2. Еще кое-что из заглавника

Я чуть не забыл о том, что при подготовке макетных плат для анализа характеристик схем и их компонентов может понадобиться некоторое количество маленьких низкопрофильных панелек для диодов, транзисторов или малогабаритных конденсаторов. Как уже было отмечено в главе 13, использовать большие макетные панели из капролона нельзя, так как паразитные емкости и индуктивности будут слишком велики. Поэтому придется воспользоваться практически той же печатной платой, которая применяется для реальной схемы, а затем установить низкопрофильные панельки для миниатюрных компонентов, в которые можно будет вставлять выводы диаметром 0,5 мм такие, как, например, компании Amp¹ (типа 50462) или компании Interconnection Products² (типа 450-2598-01-03-00).

Если лень бежать в магазин за панельками для таких элементов, можно обойтись своими силами. Возьмите одну из однорядных колодок с 25 контактами (типа тех, что указаны в каталоге Digikey's Catalog № A208, A209 или им подобных³). Если вас не волнуют паразитные емкость и индуктивность, то просто отломите кусок с таким числом контактных гнезд, сколько нужно расположить в одном ряду. Однако, если вам нужно, чтобы паразитная емкость и утечка были совсем небольшими, то с помощью косых бокорезов счистите всю пластмассу и смонтируйте

¹ AMP, P.O. Box 3608, Harrisburg, PA. 17105. (717) 564-0100.

² Interconnection Products Inc., 2601 South Garnsey, Santa Ana, CA 92797 (714) 540-9256.

³ Digikey, P.O. Box 677, Thief River Falls, Minnesota 56701-0677, (800) 3444539.

маленькие гнезда одно за другим. Нужно беречь получившуюся конструкцию от ударов, так как гнезда весьма «нежные», но, несмотря на это, могут служить в качестве отличных панелек для диодов, резисторов, конденсаторов, транзисторов и других малогабаритных компонентов с тонкими выводами. Если понадобится панелька для малогабаритных деталей с диаметром выводов 1 мм, то для этих целей отлично подойдут панельки компании Interconnection Products (типа 450-3729-01-03-00) или аналогичные изделия компании Amp (типа 645-508-1). Самое важное – постараться как можно меньше изменить паразитные емкости и индуктивности реальной схемы и «заполнить» такую макетную плату исправными деталями. Если же заменить одну из исправных деталей на дефектную или неисправную, то станет абсолютно понятно, какой компонент сбоит.

Ниже представлен окончательный список некоторых наиболее часто встречающихся неисправностей в схемах:

- перепутаны резисторы – установлены не в том месте, где надо;
- перепутан номинал резисторов – ошибочный цветовой код;
- диоды установлены наоборот;
- электролитические конденсаторы установлены наоборот;
- оборваны провода;
- установлены не там, где это необходимо, или не установлены вовсе перемычки;
- разработаны или «устали» контакты либо разболтались сами разъемы;
- замыкания, вызванные каплями припоя;
- не пропаены соединения, или есть соединения с холодной пайкой;
- перепутаны или установлены со смещением выводы интегральных микросхем;
- установлены транзисторы не того типа, или перепутаны выводы;
- неисправен или не прошел поверку измерительный прибор или тестер, которым вы пользуетесь.

Если справитесь с перечисленными проблемами, то есть хороший шанс избавиться от 50% неполадок... после чего нужно будет разобраться с очень сложными ситуациями. Желаю удачи!

14.3. Заключение

Если для вас поиск неисправностей в схемах – каждодневная рутина, неприятная работа, которой приходится заниматься по необходимости, – тогда, вероятно, я ничем не смогу вам помочь. Однако я всегда убеждался, что если относиться к любой работе такого рода как к игре, то шансы открыть новые подходы к решению задачи, сделать работу лучше и получить от всего этого удовольствие повышаются. Я имею в виду, что если, занимаясь своим делом, я выполняю задачу и никакого удовольствия не получу, то здесь что-то не так. Ха, да это же просто здорово – сидеть за столом в 0:05 и набирать этот текст! Если бы мне это не нравилось, то я бы все бросил и пошел спать. Хорошо это или плохо, однако перед вами *конец книги*, так что *спокойной ночи!*

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ С НЕСТАНДАРТНОЙ ЦОКОЛЕВКОЙ

Я опубликовал небольшой список интегральных микросхем, имеющих нестандартное расположение выводов, в журнале EDN осенью 1990 года, попросив читателей «сообщить мне, если в этом списке обнаружатся ошибки или он окажется неполным», однако с тех пор никаких замечаний так и не получил.

Например, микросхемы DM7486, DM74S86, DM74LS86 и MM74C386 имеют одинаковую цоколевку. Однако расположение выводов микросхем DM74L86 и MM74C86 *разное*. Когда была выпущена микросхема L86, она была несовместима по выводам с 7486, и, естественно, когда появилась C86, то она была совместима с L86. Некоторые из перечисленных ниже интегральных микросхем встречаются редко, уже устарели или выпускаются одной единственной компанией... Тем не менее я включил их в список для полноты информации.

Вот полный перечень схем с необычной цоколевкой:

- 74H01
- 74L51, LS51
- 74H53
- 74L54, LS54, H54
- 74H55
- 74L71
- 74L78, LS78A
- 74L85, C85
- 74L86, C86
- 74L95, C95

Читателям, возможно, не помешало бы знать, что триггеры, например DM74107, срабатывают по потенциалу, а 74LS107 – по фронту импульса тактового сигнала, поэтому в ряде случаев они могут оказаться невзаимозаменяемыми. Есть и другие подобные случаи, которые можно выявить путем тщательного изучения технических описаний и справочных листов на цифровые интегральные микросхемы (см. главу 10).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С НЕСТАНДАРТНОЙ ЦОКОЛЕВКОЙ

Мне пришлось написать одному инженеру-пенсционеру о том, что применять новые интегральные микросхемы операционных усилителей не только просто, как в случае со старыми вакуумными электронными лампами, но и во многих отношениях проще. Я начал объяснять, что использовать микросхему LM607 и подстроить напряжение смещения нуля очень просто, как и для LF355, но – стоп! Да, действительно, каждую из этих интегральных схем подстраивать можно, но для этого надо использовать различные схемы. Для подстройки микросхемы LF356 потенциометр необходимо установить между выводами 1 и 5, а движок подключить к шине питания $+V_s$, в то время как для LM607 нужен потенциометр между выводами 1 и 8. Более того, я вспоминаю, как мое внимание привлек рассказ о том, что у интегральной микросхемы LF351 выводы для подключения потенциометра расположены так, что для увеличения V_{os} надо было крутить потенциометр в *одну сторону*, а у LF441 – в *другую сторону*. После этого мы решили поставлять вариант микросхем LF441, которые с целью «улучшения» были промаркированы как LF351. Конечно, многим клиентам это «улучшение», вероятно, понравилось, но кое-кто был раздражен, так как в цепях подстройки направление регулирования сменилось на противоположное. Поэтому не стоит тратить время, сконцентрировавшись на интегральных микросхемах типа MM74C86, которые обладают нестандартным расположением выводов, и полностью игнорировать подобные проблемы с линейными интегральными микросхемами. Так что вот, они перед вами.

Во-первых, отметим, что эти заметки относятся только к одиночным операционным усилителям в 8-выводных корпусах, как металлических, так и пластмассовых. Во-вторых, выводы 2, 3 и 6 *всегда* будут считаться входами и выходом соответственно. В-третьих, выводы 4 и 7 – это всегда выводы подключения отрицательного и положительного напряжения питания (соответственно). В-четвертых, вывод 8, который остается свободным после того, как оба вывода для подключения потенциометра подстройки смещения нуля определены, почти никогда не стандартизован, и я даже не собираюсь упоминать о нем здесь. Иногда он выполняет функцию вывода для подключения дополнительных цепей коррекции или компенсации, иногда – имеет другое назначение. Больше сказать нечего.

Операционные усилители с нестандартным расположением выводов:

- LM709
- LM107, LM307
- LM118, LM318
- LM10
- LM101, LM301
- LM108, LM308
- LM144, LM344
- LH0024

В этом списке перечислены интегральные и гибридные микросхемы, отличающиеся от промышленного стандарта. Пользуйтесь техническими описаниями на конкретные интегральные микросхемы.

Тип I. Потенциометр сопротивлением 10 кОм устанавливается между выводами 1 и 5, а движок подключается к отрицательной шине питания

- LM741
- LM143 (100 кОм)
- LM776 (100 кОм)
- LM4250 (100 кОм)
- LF351
- LF411
- LF441
- LF451 (в корпусе типа SO-8)
- LF13741
- LH0022
- LH0042
- LH0052

Тип II. Потенциометр сопротивлением 25 кОм устанавливается между выводами 1 и 5, а движок подключается к положительной шине питания

- LF156, LF356
- LF155, LF355
- LF157, LF357
- LF400 (10кОм)

Тип III. Потенциометр сопротивлением 10 кОм устанавливается между выводами 1 и 8, а движок подключается к положительной шине питания

- LM11 (100 кОм)
- LM112 (100 кОм)
- LM607
- LM627
- LM637
- LM725
- OP-01 (20 кОм)

Тип IV. Потенциометр сопротивлением 100 кОм устанавливается между выводами 1 и 8, а движок подключается к отрицательной шине питания

- LM6161, LM6361
- LM6162, LM6362
- LM6164, LM6364
- LM6165, LM6365

Да, все указанные в этих списках элементы производит корпорация NSC. Может, когда-нибудь я составлю такой список для всех выпускаемых в мире интегральных схем, но сейчас на это времени нет. Я оставил достаточно места для того, чтобы вы могли делать свои пометки и пополнить этот список. (Обратите внимание, что я ни в коем случае не могу ручаться за направление, в котором нужно вращать потенциометр для того, чтобы увеличить V_{os} . Определите это самостоятельно.)

Несколько слов о сдвоенных усилителях

Все сдвоенные операционные усилители производятся в 8-выводных корпусах типа ТО-99 (часто называемых «восьминогий ТО-5»), или в 8-выводных корпусах

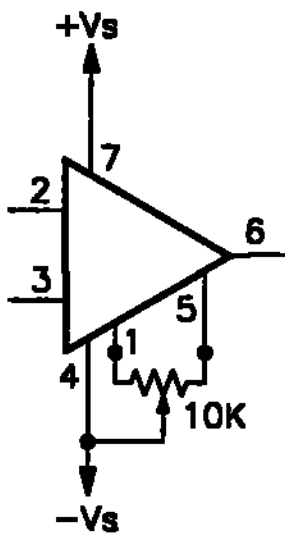


Рис. В.1. Тип I

Потенциометр устанавливается между выводами 1 и 5, а движок подключается к отрицательной шине питания.

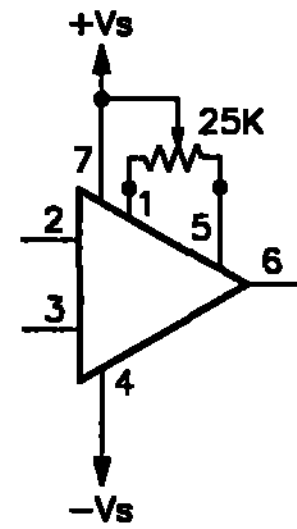


Рис. В.2. Тип II

Потенциометр устанавливается между выводами 1 и 5, а движок подключается к положительной шине питания.

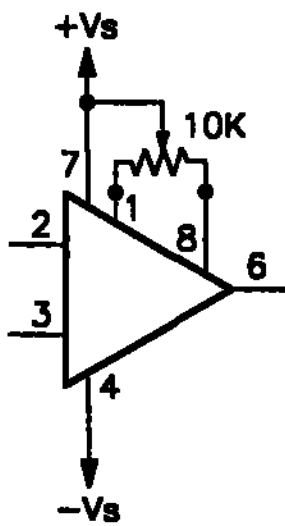


Рис. В.3. Тип III

Потенциометр устанавливается между выводами 1 и 8, а движок подключается к положительной шине питания.

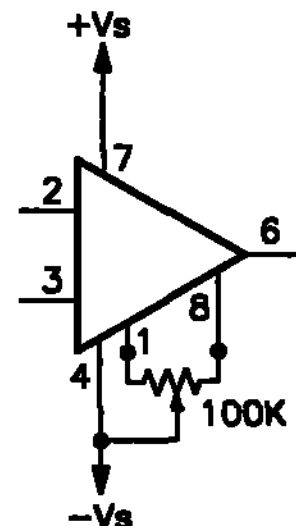


Рис. В.4. Тип IV

Потенциометр устанавливается между выводами 1 и 8, а движок подключается к отрицательной шине питания.

DIP, или в корпусах SO-8 и, насколько мне известно на сегодняшний день, имеют одинаковую схему расположения выводов. Примерами таких интегральных схем являются: LM158, LM883, LM1558, LM6218, LF412, LF442, LF453, LMC662, LPC662 и т.д., и т.п. Я считаю, что среди этих устройств нет исключений – сообщите мне, если я не прав.

Старые сдвоенные операционные усилители LM747 в корпусе с 10 выводами или сдвоенный операционный усилитель LM709 в 14-выводном корпусе и вообще все сдвоенные усилители, у которых на корпусе больше 8 выводов, сейчас не в счет.

Несколько слов о счетверенных усилителях

У всех счетверенных операционных усилителей, выпускаемых в 14-выводных корпусах DIP, одинаковая схема расположения выводов, за исключением микросхемы LM4136.

К интегральным схемам со стандартным размещением выводов относятся: LM124/LM324, LP324, LM349, LM837, LF347, LF444, LMC660, LPC660 и т.д. Среди счетверенных усилителей очень немного исключений.

Замечание: у счетверенных компараторов, подобных микросхеме LM339, расположение выводов отличается от расположения выводов счетверенных операционных усилителей. Даже питание к ним подводится по-другому. Выводы счетверенных операционных усилителей Нортонa также расположены нестандартно.

ПРИЛОЖЕНИЕ С

ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ШУМОВ В ТРЕХВЫВОДНЫХ СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ¹

Эрролл Г. Дитс (Erroll H. Dietz), старший техник, National Semiconductor Corporation

Наиболее распространенный подход к снижению напряжения шумов в трехвыводных стабилизаторах напряжения заключается в том, что на выходе устанавливается конденсатор, а в случае применения регулируемых стабилизаторов – еще и на выводе регулирования выходного напряжения. Как оказалось, на большинстве стабилизаторов напряжения установка дополнительного конденсатора может снизить уровень шумов в очень широком диапазоне частот, но при этом в определенной узкой полосе частот уровень напряжения шумов может увеличиться. Выходное полное сопротивление большей части трехвыводных интегральных стабилизаторов в определенном диапазоне частот имеет заметную индуктивную составляющую, поэтому добавление выходных конденсаторов с целью снижения уровня шумов и улучшения переходной (импульсной) характеристики также может иметь побочный эффект. В примерах, приведенных в этом приложении, использован регулируемый интегральный стабилизатор напряжения LM317, но полученные данные, соответствующим образом перемасштабированные, могут быть применены к трехвыводным интегральным стабилизаторам напряжения всех остальных типов.

Как следует из рис. С.1, выходное полное сопротивление интегрального стабилизатора LM317 в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц имеет индуктивный характер. Это никак не связано с длиной проводов или выводов, а является интерпретацией того факта, что все операционные усилители спроектированы так, чтобы коэффициент усиления с ростом частоты уменьшался на 6 дБ на октаву.

Обычно эта особенность мало интересует среднего пользователя микросхем интегральных стабилизаторов. Однако наличие индуктивной составляющей в выходном полном сопротивлении и емкости выходного конденсатора может привести к резкому возрастанию уровня шумов в некоторой узкой полосе частот. Этот пик шумовой составляющей приходится на резонансную частоту контура, образованную

¹ Перепечатывается с разрешения журнала Electronic Design.

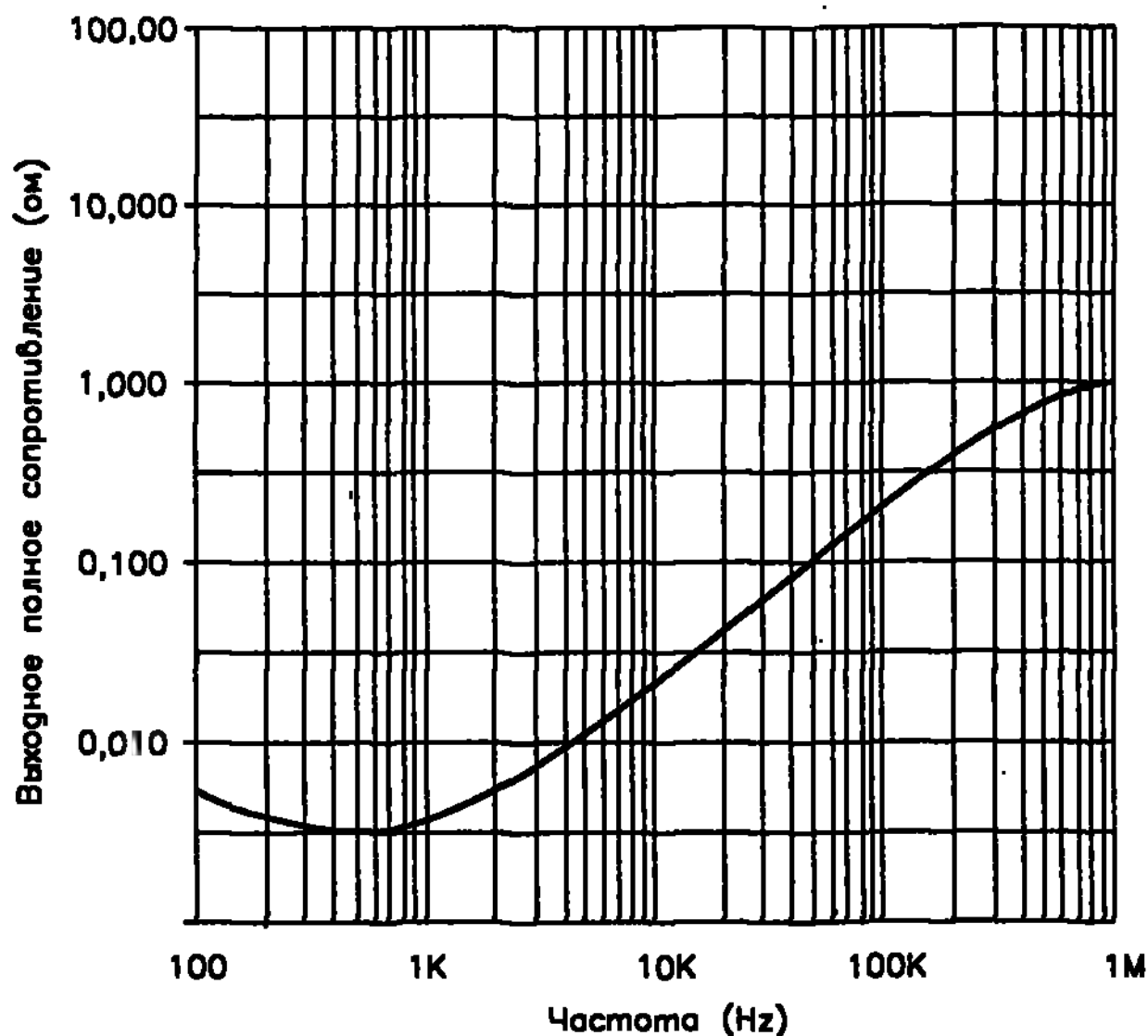


Рис. С.1. Зависимость выходного полного сопротивления интегрального стабилизатора LM317 от частоты при токе нагрузки $I_L = 500$ мА

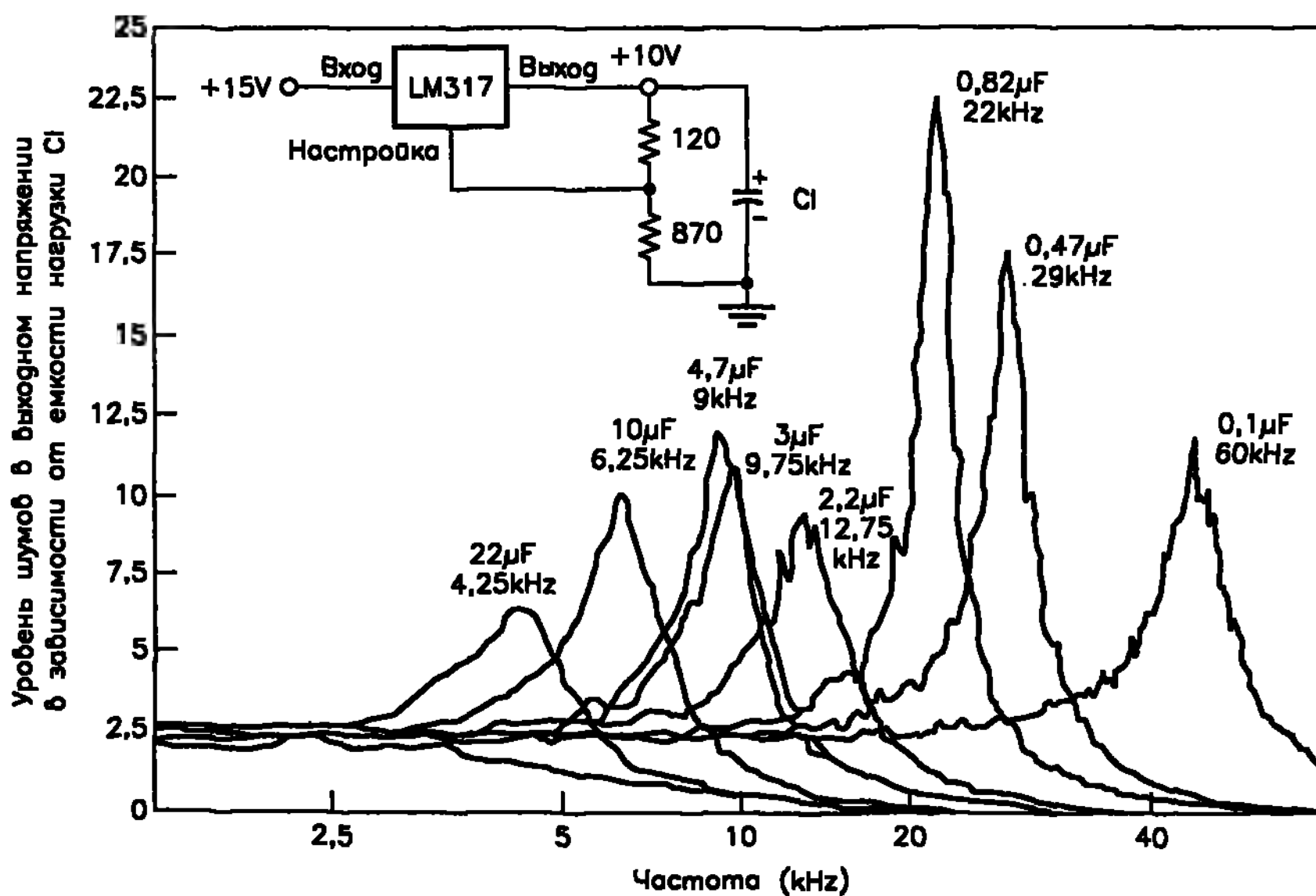


Рис. С.2. Примеры огибающих спектров напряжения шумов, генерируемых в интегральном стабилизаторе LM317 при различной емкостной нагрузке

индуктивной составляющей выходного сопротивления стабилизатора и выходной емкостью в цепи нагрузки. На рис. С.2 показаны типичные пики в огибающей спектра напряжения шумовой составляющей на выходе интегрального стабилизатора LM317 при различных емкостях нагрузки. Диапазон частот, на которых может появиться такой пик, не должен быть значительно выше 100 кГц и значительно ниже 10 кГц, что обуславливается омическими потерями как в выходной емкости, так и в выходном полном сопротивлении микросхемы. Частоту максимума можно определить в соответствии с классической формулой:

$$1/(2\pi\sqrt{LC}).$$

Амплитуда этого пика в спектре шумов будет изменяться в зависимости от добротности Q эквивалентного резонансного контура, на которую основное влияние оказывает эквивалентное последовательное сопротивление выходного конденсатора и которая пропорциональна коэффициенту усиления опорного напряжения. К примеру, при использовании высококачественного полипропиленового конденсатора емкостью 1 мкФ с эквивалентным последовательным сопротивлением в 20 мОм на частоте 30 кГц амплитуда пика в спектре шумового напряжения будет в 3 раза больше, чем та же амплитуда, но при использовании танталового конденсатора той же емкости с эквивалентным последовательным сопротивлением, равным на такой частоте 1 или 2 Ом. Кроме того, шумы в полосе частот пика присутствуют на входе стабилизатора, но их уровень приблизительно на 20 дБ ниже уровня шумов на выходе стабилизатора.

Мало кому известно, что выходное полное сопротивление трехвыводных стабилизаторов может значительно изменяться в зависимости от силы тока нагрузки и установленного выходного напряжения, которые, в свою очередь, влияют на центральную частоту шумового пика. При увеличении тока нагрузки значение g_m выходного транзистора стабилизатора также увеличивается. Это вызывает уменьшение выходной индуктивной составляющей (см. рис. С.3), которое продолжается до тех пор, пока доминирующими составляющими выходного сопротивления не станут сопротивление датчика схемы ограничения тока, сопротивление проводников, соединяющих кристалл с выводами, сопротивление самих выводов. Это относится ко всем интегральным стабилизаторам – положительного и отрицательного напряжения, к регулируемым стабилизаторам и стабилизаторам с фиксированным уровнем выходного сигнала, а также к стабилизаторам большой и малой мощности. Ранее считалось, что зависимость выходного полного сопротивления Z_{out} от частоты может быть представлена определенной кривой, однако на самом деле существует семейство кривых для различных уровней выходного тока (см. рис. С.4).

Подводя итог, отметим, что типичное значение емкости конденсаторов выходных фильтров, которые традиционно применялись в схемах трехвыводных интегральных стабилизаторов, может обеспечить определенное снижение уровня шумов не на всех частотах, а только в некотором диапазоне. В большинстве случаев наличие на выходе источника питания шумовой составляющей в несколько микровольт на частотах 5 или 10 кГц никаких проблем не вызовет.

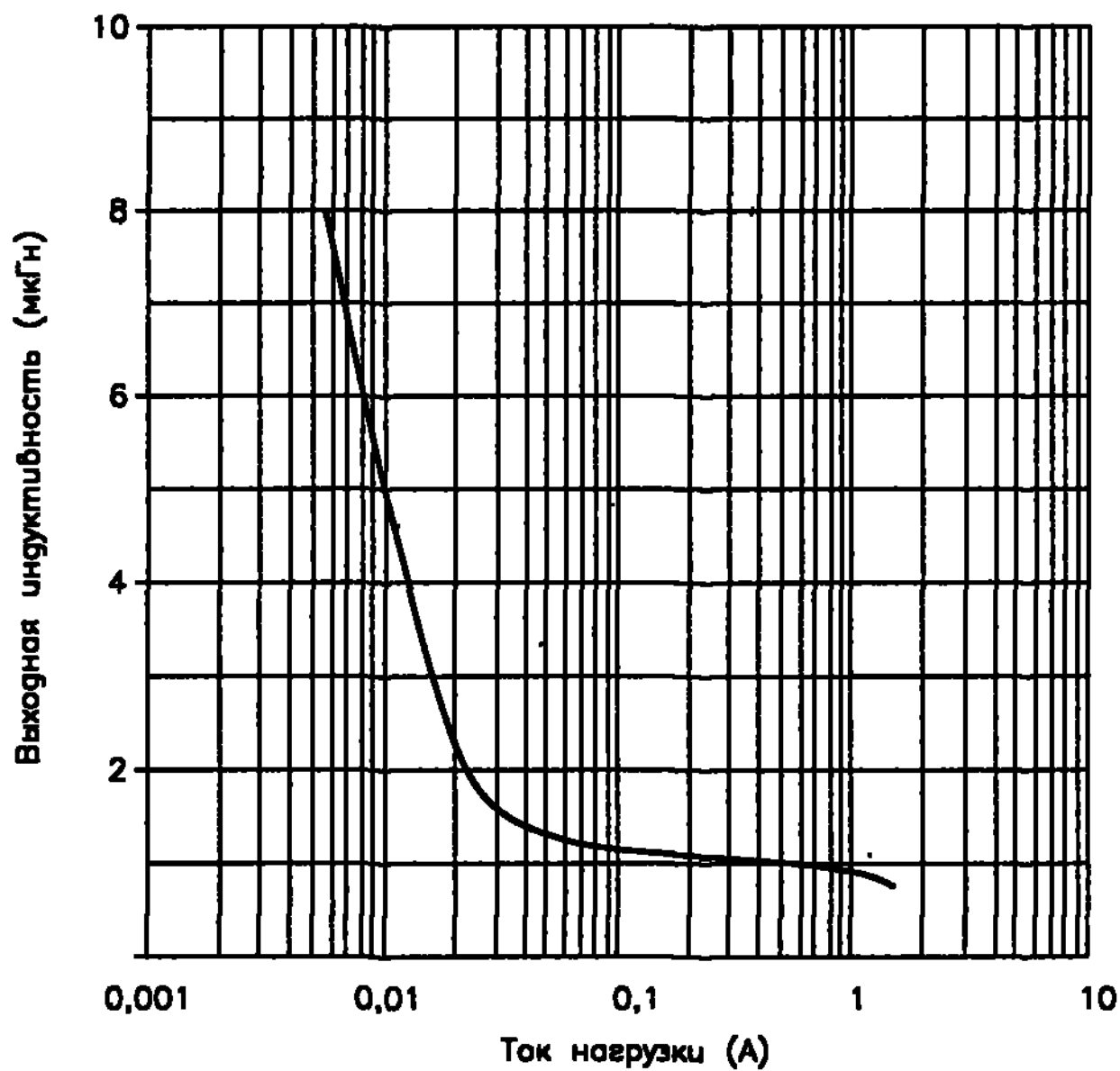


Рис. С.3. Зависимость выходной индуктивности интегрального стабилизатора LM317 от нагрузки

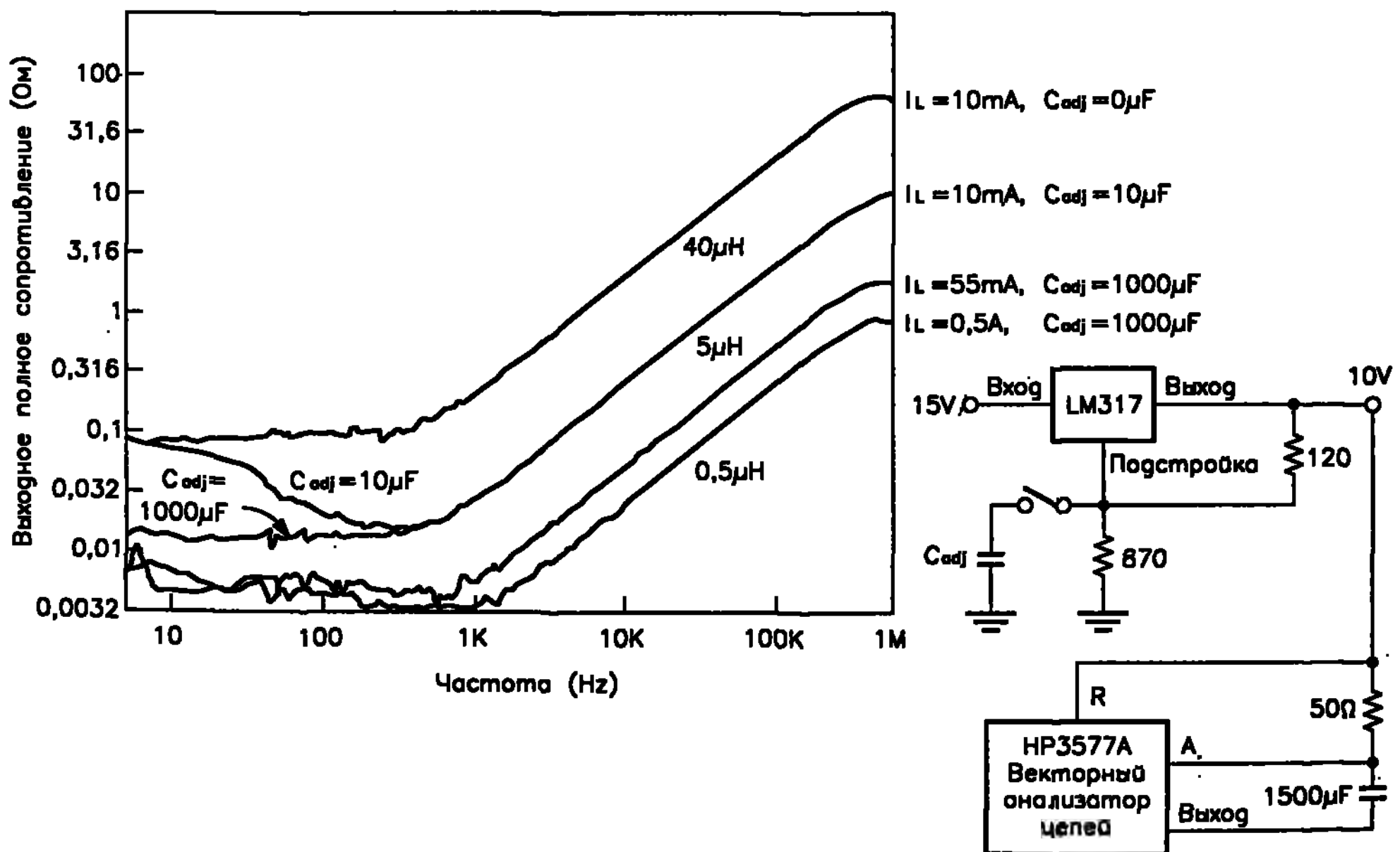


Рис. С.4. Зависимость выходного полного сопротивления от частоты при различном выходном токе

Тем не менее если схема разрабатываемого устройства особенно чувствительна к чрезмерному уровню шумов в цепях питания на какой-то определенной частоте, то пользователь может легко подобрать подходящий конденсатор для фильтрации выходного напряжения стабилизатора и спроектировать его выходную цепь так, чтобы пик в спектре шумов не попадал в интересующий диапазон. В малозумящих устройствах следует избегать применения конденсаторов емкостью 0,1–20 мкФ, особенно тех, у которых низкое эквивалентное последовательное сопротивление. Для наиболее эффективного подавления шумов необходимо устанавливать на выходе электролитические конденсаторы емкостью не менее 50 мкФ, и при наличии регулируемого стабилизатора – еще один конденсатор, емкостью не менее 1 мкФ на выводе РЕГУЛИРОВКА. Кроме того, пользователь должен учитывать, что изменение тока нагрузки или выходного напряжения могут изменить индуктивную составляющую выходного сопротивления. Поэтому работу схемы необходимо проверить во всем диапазоне эксплуатационных токов нагрузки и выходных напряжений.

ПРИЛОЖЕНИЕ D

ИЗМЕРЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ КОМПАРАТОРАХ

Как было отмечено в главе 9, измерить напряжение смещения нуля V_{os} быстродействующих компараторов далеко не просто, но если обдумать все аспекты этой проблемы, это все-таки возможно. У всех быстродействующих компараторов обычно наблюдается тенденция к возникновению самовозбуждения при подаче на входы напряжения близкого к нулю. Однако для измерения напряжения смещения нуля придется использовать входные напряжения почти нулевого уровня. Решение этой дилеммы заключается в том, чтобы заставить компаратор возбуждаться на задаваемой *вами* частоте. Обыкновенный генератор на операционном усилителе (рис. D.1) работает очень хорошо, однако это не прецизионная схема, так как амплитуда выходного сигнала определяется не очень точно.

Быстродействующие компараторы проектируют так, что их выходные каскады не позволяют получить на выходе сигналы большой амплитуды или симметричные. А выходной сигнал тех компараторов, у которых на выходах используется логика с эмиттерными связями (ЭСЛ), и вовсе минимален. Поэтому усиление в контур добавим с помощью микросхемы LM311 (рис. D.2), а для получения симметричного выходного сигнала используем несколько элементов микросхемы MM74C04. В этой схеме на неинвертирующий вход испытуемого устройства поступает симметричный сигнал с размахом ± 10 мВ, а сигнал на инвертирующем входе компаратора имеет форму, близкую к треугольной, и изменяется между уровнями напряжения, определяемыми двумя выражениями $(+10 \text{ мВ} + V_{os} - V_{шумов})$ и $(-10 \text{ мВ} + V_{os} - V_{шумов})$. Тогда среднее значение напряжения на инвертирующем входе будет равно напряжению смещения нуля V_{os} , что и требовалось получить.

Далее. Смещение нуля этой схемой было бы измерено с ошибкой, если у компаратора LM311 обнаружилась бы большая задержка срабатывания в одном направлении и еще более длительная в противоположном. Это может стать серьезным препятствием, *если* не добавить в схему небольшой ускоряющий гистерезис по переменному току, в виде цепочки из последовательно включенных резистора сопротивлением 4,7 кОм и конденсатора емкостью 100 пФ. Эта цепочка заставляет испытуемое устройство переключиться и запустить формирование второго полупериода как только напряжение входного сигнала перейдет порог и уровень

на выходе компаратора начнет изменяться, не дожидаясь срабатывания компаратора LM311, которое происходит со значительной задержкой. Как было показано в главе 9, цепочки положительной обратной связи, вносящие гистерезис только по переменному току, работают кратковременно, лишь в течение цикла заряд-разряд конденсатора, и поэтому не оказывают влияния на точность работы всего генератора.

Схема, приведенная на рис. D.3, очень похожа на предыдущую, но она адаптирована для использования с быстродействующими компараторами, предназначенными для работы с микросхемами ЭСЛ, к примеру с компараторами типа $\mu A6685$. Порог для микросхемы LM311 изменяется, а величина гистерезиса по переменному току сохраняется прежней за счет изменения импеданса цепочки положительной обратной связи. Генерация возникает на частоте 0,4 МГц. Никаких побочных возбуждений и звонов ни разу не наблюдалась, хотя, как и для всех быстродействующих цепей, проработка разводки платы строго обязательна.

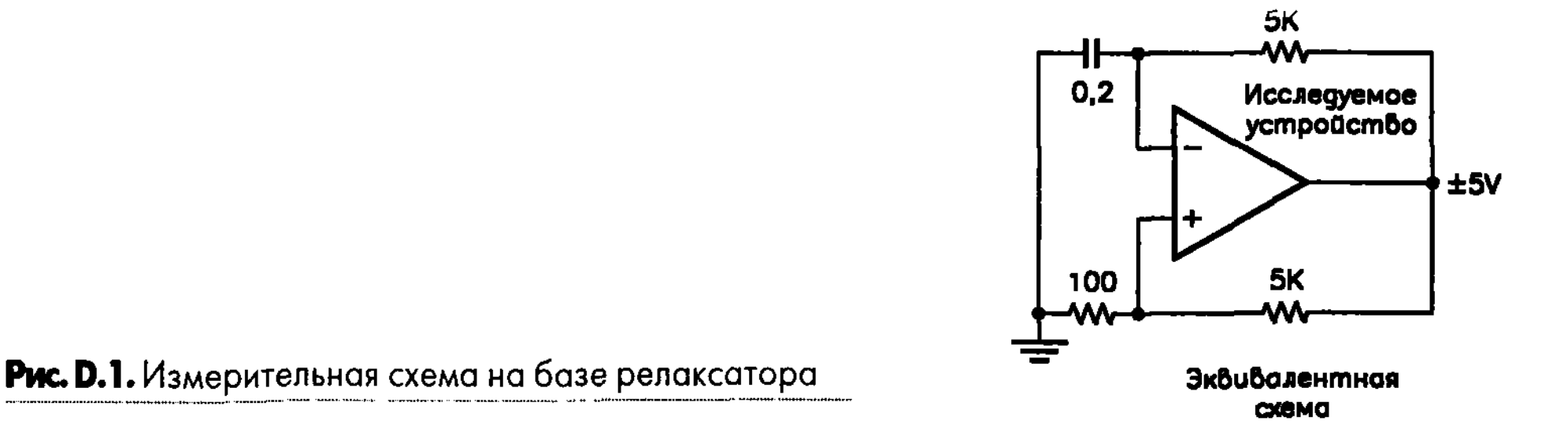


Рис. D.1. Измерительная схема на базе релаксатора

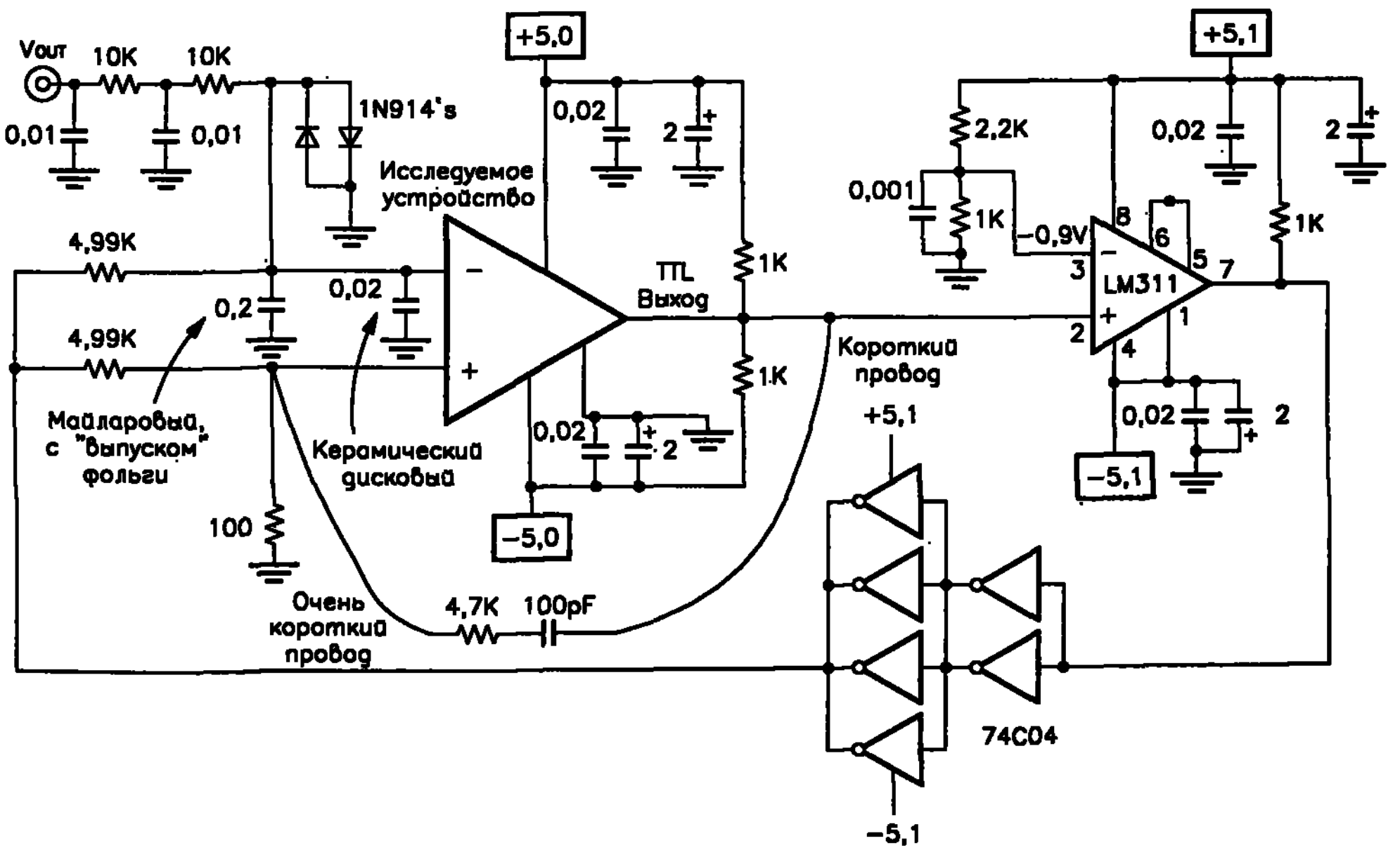


Рис. D.2. Схема, обеспечивающая точный определенный уровень выходного напряжения

Примечание к рис. Все емкости конденсатора указаны в μF .

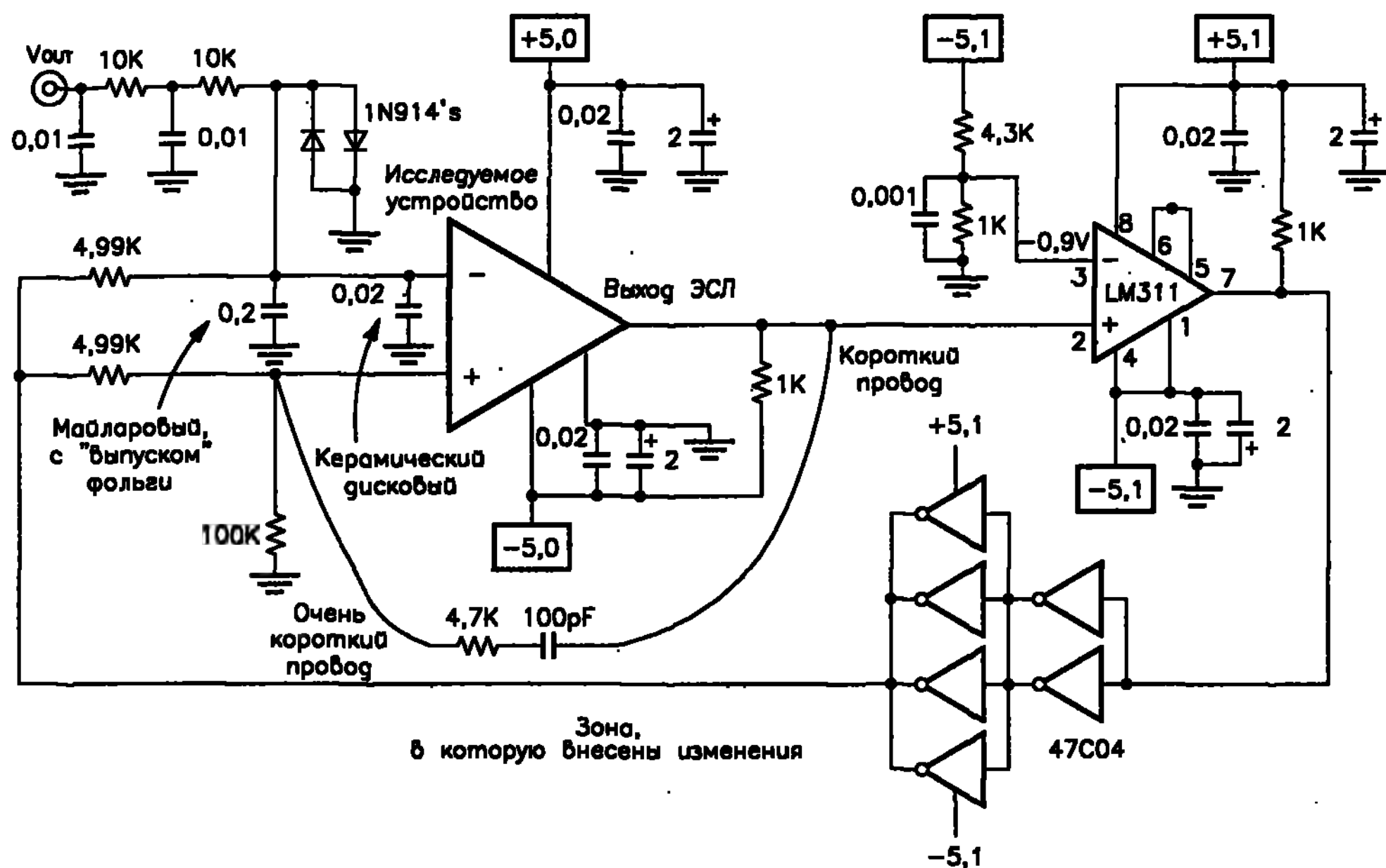


Рис. D.3. Схема для испытаний компараторов, работающих с ЭСЛ микросхемами

Примечание к рис. Все емкости конденсатора указаны в μF .

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

ЗАВИСИМОСТЬ V_F ОТ I_F У РАЗНЫХ ДИОДОВ

Перечень диодов

- A. SR306 – выпрямительный диод Шоттки
- B. 1N87G – германиевый диод
- C. HP5082-2811 – диод Шоттки
- D. Большой старый селеновый выпрямитель
- E. 3S14 – выпрямительный диод
- F. 1N4001 – кремниевый выпрямительный диод
- G. 1N4148/1N914
- H. HER103 – сверхбыстродействующий выпрямительный диод
- I. 1N645
- J. FD300 – диод с низким уровнем утечки
- K. $-V_{BE}$ транзисторной сборки LM194/LM394
- L. V_{BE} транзистора 2N3904
- M. V_{CB} транзистора 2N3904
- N. V_{BE} транзисторной сборки LM3046
- O. Переход прибора 4N28, выводы 1 и 2
- P. Красный светодиод
- Q. Зеленый, желтый или красный светодиод повышенной яркости

Примечания.

1. Графики для диодов FD200 и FD600 имеют ту же форму, что и для 1N4148.
2. Кривые K, L, N получены при условии, что коллекторы соединены с базой.
3. Все данные снимались при температуре 25 °C.
4. Для того чтобы получить точные данные при малых значениях, необходимо поместить светодиоды в темноту.

Несколько слов о зависимости V_F от $\text{Log } I_F$

1. Обратите внимание на различные углы наклона характеристик диодов! Я бы не стал приводить столь запутанный набор графиков, однако и в действительности все сильно запутано...

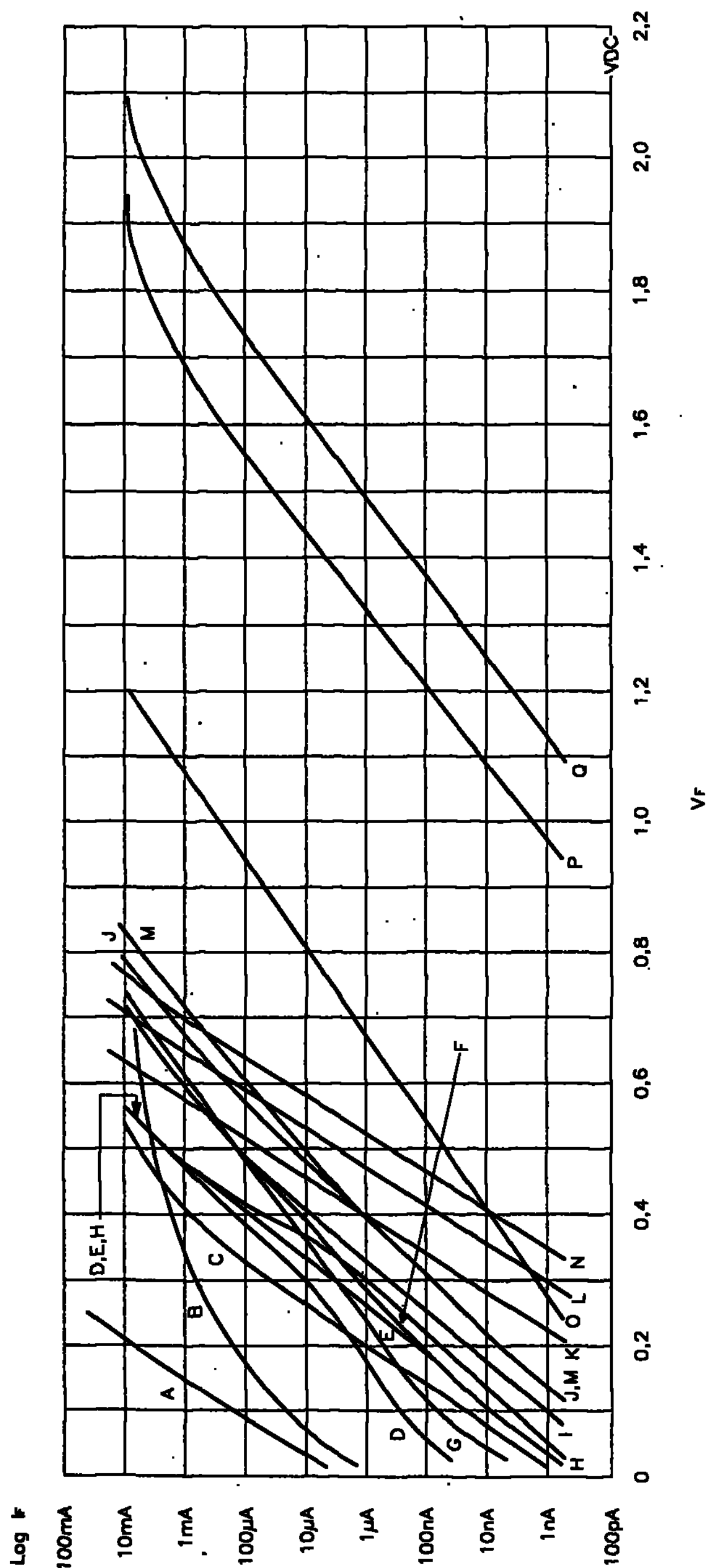


Рис. Е.1. Графики зависимости V_F от I_F для различных диодов в полулогарифмическом масштабе

2. Крутизна характеристики диодов из семейства 1N4148 составляет приблизительно 115 мВ на декаду изменения тока, по сравнению приблизительно с 65 мВ на декаду у некоторых диодов Шоттки, 60 мВ на декаду у транзисторов и лежащими между ними значениями для диодов других типов. Вряд ли кто-нибудь говорил вам об изменении характеристик в столь большом диапазоне!
3. Обратите внимание, что наклон графиков V_{BE} всех транзисторов одинаков, и он лучше (круче), чем у большинства диодов. Несмотря на это, их можно использовать до тех пор, пока $V_{\text{обратное}}$ не превышает ~ 6 В. (В транзисторной сборке LM394 между базой и эмиттером встроены защитные диоды, поэтому на эту интегральную схему нельзя подавать обратное смещение.)
4. Обратите внимание на то, что наклон характеристики для перехода коллектор-база у транзистора 2N3904 (кривая М) хуже всех – то есть проводимость хуже, чем у перехода база-эмиттер. Следовательно, при большой силе тока на этом переходе более высокое прямое падение напряжения V_F , зато при малых напряжениях у него больше утечка.
5. Заметим, что красный светодиод может пропускать прямой ток силой всего 1 пА при подаче на него прямого смещения напряжением 0,6 В! Для того чтобы избежать появления фототоков, светодиоды нужно держать в темноте.
6. Учтите, что я начал проводить измерения V_F у некоторых из перечисленных элементов с помощью характериографа. Позже я заметил, что получаемые характеристики V_F не соответствовали действительности – калибровка характериографа оставляла желать лучшего. Я тут же показал этому прибору черный флаг и отправил его на полку. Затем я попробовал измерить V_F диода цифровым вольтметром, работающим на батарейках, подключенным последовательно с диодом. Результаты получились обескураживающие: у хорошего транзистора ток утечки составил 30 нА при напряжении 100 мВ. Нанеся полученные данные на график, я понял, что чуть было не обманул. Очень важно использовать графики – вы можете видеть форму кривой, и если получается что-то бессмысленное, сразу это заметите. Выяснилось, что с цифрового вольтметра на диод попадал переменный шумовой ток, которого хватило для того, чтобы после выпрямления получились ложные значения прямого тока. (Помните, я предупреждал об этом в главе 2.) После установки параллельно диоду конденсатора емкостью 0,47 мкФ я получил данные, заслуживающие доверия. Не забывайте, каждый может снять искаженные данные – это всегда проще, чем получить точную информацию. Просто надо быть внимательным и постоянно готовым остановиться и вернуться назад. После этого убедиться в том, что причина, вызывающая неверные данные, полностью устранена, и получить уже достоверные данные.

ПРИЛОЖЕНИЕ F

КАК ПРАВИЛЬНО ЧИТАТЬ ТЕХНИЧЕСКУЮ ДОКУМЕНТАЦИЮ¹

Не вся техническая документация составляется по одному принципу, и ложные допущения могут стоить инженерам времени и средств.

Роберт А. Пиз

Когда на рынок попадает новое устройство, мы все надеемся, что его сопровождает четкая, ясная и понятная техническая документация.

Из технической документации потенциальный пользователь может узнать о назначении и рабочих характеристиках устройства, а также ознакомиться с разнообразными примерами типичных схем и характеристик. Если автор технической документации с должным усердием отнесся к своей работе, то, ознакомившись с ней, пользователь может решить, подходит ли ему это устройство, точно определить, насколько оно его устраивает и какие меры предосторожности необходимо предпринять, чтобы избежать неприятностей.

Параметры и характеристики

В самом важном разделе технической документации содержатся сведения о гарантированных характеристиках, а также об условиях, в которых проводились испытания. В идеале должны быть четко описаны все характеристики, которые могут понадобиться пользователю. Техническая документация устройства, аналогичного уже существующим, обычно похожа на техническую документацию этих аналогов.

Однако если в устройство внесены значительные изменения и усовершенствования, которые раньше нигде не применялись, то автор технической документации должен пояснить, что подразумевается под каждой характеристикой. Может даже возникнуть необходимость включить в приложение определения применяемых в технической документации новых терминов.

Например, когда на рынке впервые появились операционные усилители с малым временем установления, некоторые изготовители определяли этот параметр как промежуток между началом изменения уровня сигнала и моментом, когда выходной сигнал окончательно зафиксируется в пределах погрешности. Однако другие изготовители определяли время установления с учетом времени нарастания. Благодаря тому, что и те, и другие четко описали это в технической документации, пользователь вряд ли что-нибудь перепутает.

¹ Перепечатано с разрешения Electronic Engineering Times.

Тем не менее я хотел бы предостеречь читателей. Иногда при подготовке технической документации какой-нибудь параметр, объективно имеющий не самые лучшие (для некоторых пользователей) значения, представляют так, чтобы создавалось впечатление идеального по этим характеристикам устройства (правда, это может быть верно для одного-двух пользователей).

Гарантии

Когда в технической документации приведено гарантированное минимальное значение того или иного параметра, то что это значит? Можно было бы предположить, что изготовитель действительно провел измерения этого параметра и уверен в соответствии ему всех отгруженных клиентам устройств. Однако это не совсем так.

Например, в первые годы производства операционных усилителей (20 лет назад) могла возникнуть ситуация, когда гарантировалось дифференциальное входное сопротивление усилителя $Z_{in} = 1$ МОм. При этом было ясно, что сопротивление производителем не измерялось. Если покупатель настаивал на том, что он «должен знать, как именно производились измерения сопротивления», ему объясняли, что оно не измерялось, зато был измерен ток базы. Тесная взаимосвязь I_b и Z_b позволила использовать простое измерение постоянного тока вместо довольно нечеткого теста с высоким уровнем помех, результаты которого трудно интерпретировать.

Каждый год в течение последних 20 лет изготовители усилителей пытаются объяснить с переменным успехом, почему они не измеряют непосредственно Z_{in} , несмотря на то, что гарантируют его значение.

В других случаях изготовитель может описать испытание, проводившееся при проверке кристалла на пластине. После того как кристалл корпусирован, этот тест провести невозможно, так как нельзя добраться до точки съема сигнала. Для того чтобы не вводить пользователя в замешательство и не сбивать его с толку, ряд изготовителей ввели два класса гарантированных технических параметров:

- проверенное ограничение формулируется после проведения испытания, результаты которого нельзя оспорить, поскольку оно реально проводится на всех 100% устройств, в 100% случаев;
- конструктивное ограничение относится ко всем остальным испытаниям, которые могут быть непрямыми, неявно выраженными. Также конструктивное ограничение может быть обусловлено особенностями внутренней структуры устройства. Маловероятно, что это вызовет отказы в этом тесте на уровне один сбой на 1000 экземпляров.

Зачем было принято подобное деление? Не только потому, что пользователи хотели знать, на какие именно из технических параметров гарантии подтверждены испытаниями. Это было вызвано тем, что группа обеспечения гарантии настаивала на том, что очень важно отделить технические параметры, проверенные тестированием, от конструктивных ограничений для того, чтобы улучшить приемочный уровень качества с 0,1% (1/1000) до значения, не превышающего 100 млн^{-1} (1/10000).

Таблица F.1

Параметр	Условия	LM34A			LM34CA			Единица измерения (макс.)
		Номинальные	Проверяемый допуск (примечание 4)	Конструктивный допуск (примечание 5)	Номинальные	Проверяемый допуск (примечание 4)	Конструктивный допуск (примечание 5)	
Точность (примечание 7)	$T_A = +77^\circ\text{F}$	$\pm 0,4$	$\pm 1,0$		$\pm 0,4$	$\pm 1,0$		$^\circ\text{F}$
	$T_A = 0^\circ\text{F}$	$\pm 0,6$			$\pm 0,6$		$\pm 2,0$	$^\circ\text{F}$
	$T_A = T_{\text{макс}}$	$\pm 0,8$	$\pm 2,0$		$\pm 0,8$	$\pm 2,0$		$^\circ\text{F}$
	$T_A = T_{\text{мин}}$	$\pm 0,8$	$\pm 2,0$		$\pm 0,8$		$\pm 3,0$	$^\circ\text{F}$
Нелинейность (примечание 8)	$T_{\text{мин}} < T_A < T_{\text{макс}}$	$\pm 0,35$		$\pm 0,7$	$\pm 0,30$		$\pm 0,6$	$^\circ\text{F}$
Коэффициент преобразования (среднее значение)	$T_{\text{мин}} < T_A < T_{\text{макс}}$	$+10,0$	$+9,9;$ $+10,1$		$+10,0$		$+9,9;$ $+10,1$	$\text{мВ}/^\circ\text{F}$, мин. $\text{мВ}/^\circ\text{F}$, макс.
Коэффициент стабилизации выходного напряжения по нагрузке (примечание 3)	$T_A = +77^\circ\text{F}$ $T_{\text{мин}} < T_A < T_{\text{макс}}$ $0 \leq I_L \leq 1 \text{ мА}$	$\pm 0,4$ $\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$	$\pm 0,4$ $\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$	$\text{мВ}/\text{мА}$ $\text{мВ}/\text{мА}$
Нестабильность выходного напряжения или тока по входу	$T_A = +77^\circ\text{F}$ $5 \text{ В} \leq V_S \leq 30 \text{ В}$	$\pm 0,01$ $\pm 0,02$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$ $\pm 0,02$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\text{мВ}/\text{В}$ $\text{мВ}/\text{В}$
Ток в рабочей точке (примечание 9)	$V_S = +5 \text{ В}$, $+77^\circ\text{F}$	75	90	160	75	90	139	мкА
	$V_S = +5 \text{ В}$	131			116			мкА
	$V_S = +30 \text{ В}$, $+77^\circ\text{F}$	76	92	163	76	92	142	мкА
	$V_S = +30 \text{ В}$	132			117			мкА
Изменение рабочего тока (примечание 3)	$4 \text{ В} \leq V_S \leq 30 \text{ В}$, $+77^\circ\text{F}$	$+0,5$	2,0		0,5	2,0		мкА
	$5 \text{ В} \leq V_S \leq 30 \text{ В}$	$+1,0$		3,0	1,0		3,0	мкА
Температурный коэффициент рабочего тока		$+0,30$		$+0,5$	$+0,30$		$+0,5$	мкА/ $^\circ\text{F}$
Минимальная температура, при которой схема работает с заданной точностью	В схеме, изображенной на рис. 1, $I_L = 0$	$+3,0$		$+5,0$	$+3,0$		$+5,0$	$^\circ\text{F}$
Долговременная стабильность	$T_I = T_{\text{макс}}$ для 1000 часов				$\pm 0,16$			$^\circ\text{F}$

В некоторых видах технической документации гарантируются характеристики, проверка которых – дело непростое (еще более сложное, чем контроль уровня шумов), и ее проведение требует больших финансовых затрат, как, например, долговременный дрейф (20 млн^{-1} или 50 млн^{-1} за 1000 ч).

В технической документации не указывается, измерено ли данное ограничение, получено ли в результате статистической обработки или теоретически рассчитано. Некоторые изготовители проводят 100-процентное тестирование, в то время как другие заявляют: «Гарантия подтверждена выборочной проверкой». Это совсем не означает, что устройство полностью пригодно, особенно в самых серьезных случаях, когда только длительное испытание может показать, действительно ли данное устройство удовлетворяет техническим условиям изготовителя. Если у вас возникают сомнения – свяжитесь с ним.

Средние значения, или «норма»

Вслед за колонкой гарантированных технических параметров обычно располагается колонка с названием «Типичные» (см. табл. F.1).

Возможно, этот термин свидетельствует о том, что производителю как-то раз попался экземпляр устройства именно такого качества. Возможно, он показывает, что половина деталей лучше, чем сказано в технической документации, а половина – хуже. Но точно так же может означать, что пять лет назад половина деталей была лучше, а половина – хуже. Возможно, что некоторые оказались немного лучше, а другие – немного хуже. Если уровень шумов в усилителе вплотную подходит к теоретическому пределу, найти что-нибудь с лучшими характеристиками маловероятно, а вот экземпляры с худшими характеристиками всегда найдутся.

Если в схеме важна величина тока смещения I_b операционного усилителя, то можно встретить различные определения этого параметра. К примеру, пусть в спецификациях сказано, что максимальное значение $I_b = 200 \text{ нА}$. Тогда может случиться, что в какой-нибудь партии встретятся экземпляры, где $I_b = 40 \text{ нА}$ (входные транзисторы с большим β), а месяцем позже будет много элементов с $I_b = 140 \text{ нА}$ (значение β меньше).

Предельно допустимые величины

(См. примечание 11)

Если вам необходимы устройства, рассчитанные на использование в военных и аэрокосмических целях, пожалуйста, свяжитесь с отделом продаж фирмы National Semiconductor, где вас проконсультируют по вопросам наличия таковых и их характеристик.

Напряжение питания	+35...–0,2 В
Выходное напряжение	+6...–0,1 В
Выходной ток	10 мА
Температура хранения:	
в корпусе ТО-46	–76...+356 °F (–60 °C...+180 °C)
в корпусе ТО-92	–76...+300 °F (–60 °C...+149 °C)

Температура выводов (пайка, 4 секунды)¹:

в корпусе ТО-46	+300 °C
в корпусе ТО-92	+260 °C

Расчетная рабочая температура (примечание 2):

	$T_{\text{мин}}$	$T_{\text{макс}}$
LM34, LM34A	−50 °F (−45 °C)	+300 °F (+149 °C)
LM34C, LM34CA	−40 °F (−40 °C)	+230 °F (+110 °C)
LM34D	+32 °F (0 °C)	+212 °F (+100 °C)

Электрические параметры по постоянному току

(См. примечания 1 и 6)

Примечание 1. Если не указано другого, то этот технический параметр соответствует $-50\text{ °F} \leq T_j \leq +300\text{ °F}$ для LM34 и LM34A; $-40\text{ °F} \leq T_j \leq +230\text{ °F}$ для LM34C и LM34CA; $+32\text{ °F} \leq T_j \leq +212\text{ °F}$ для LM34D. Для схемы, изображенной на рис. 2, $V_s = +5\text{ В}$, $I_{\text{нагрузки}} = 50\text{ мкА}$; $+6\text{ В}$ постоянного тока для LM34 и LM34A для $230\text{ °F} \leq T_j \leq 300\text{ °F}$. Эти технические параметры также верны для схемы, изображенной на рис. 1, для диапазона температур от $+5\text{ °F}$ до $T_{\text{макс}}$.

Примечание 2. Тепловое сопротивление корпуса ТО-46 составляет 792 °F/Вт (422 °C/Вт) в спокойном воздухе и 43 °F/Вт (6 °C/Вт) для соединений с корпусом. Тепловое сопротивление корпуса ТО-92 составляет 324 °F/Вт (162 °C/Вт) в спокойном воздухе.

Примечание 3. Нестабильность выходного сигнала измеряется при постоянной температуре соединений путем импульсного тестирования с коротким рабочим циклом. Изменения выходного сигнала в результате нагрева легко подсчитать, умножив внутреннее рассеяние на температурное сопротивление.

Примечание 4. Проверенные ограничения имеют гарантированные значения и проходят 100-процентную проверку при производстве.

Примечание 5. Конструктивные ограничения имеют гарантированные значения (но не проходят 100-процентной проверки при производстве) при указанной температуре и диапазоне напряжения питания. Эти ограничения не используются для вычисления выходных уровней качества.

Примечание 6. Технические параметры, выделенные полужирным шрифтом, справедливы во всем диапазоне допустимых температур.

Примечание 7. Точность определяется как ошибка между выходным напряжением и произведением температуры корпуса прибора на коэффициент 10 мВ/°F при заданных рабочих напряжении, токе и температуре (по шкале Фаренгейта).

Примечание 8. Нелинейность определяется как отклонение графика зависимости выходного напряжения от температуры от наиболее близкой к ней прямой линии на всем диапазоне допустимых температур.

Примечание 9. Понятие тока в рабочей точке определяется по схеме на рис. 1.

Примечание 10. Чтобы навести справки о наличии LM34CAZ, свяжитесь с производством.

¹ 4 секунды на пайку – это новый стандарт для пластмассовых корпусов.

Примечание 11. Абсолютный максимум номинального значения определяет ограничения, выход за пределы которых может повредить устройство. Технические параметры по постоянному и переменному току недействительны, если устройство работает в условиях, не соответствующих оговоренным в технической документации (см. п. 1)¹.

Подробно о справочном листке

Давайте более подробно рассмотрим техническую документацию интегральной схемы LM34, которая является датчиком температуры.

В п. 1 перечислены номинальные условия проведения испытаний и параметры схем для проведения этих испытаний, для которых определены все характеристики. В колонке «Условия» перечислен ряд дополнительных условий проведения испытаний, но примечание 1 позволяет слегка распутать ситуацию.

В п. 2 примечаний сообщаются параметры теплового сопротивления (которые также могут быть указаны в графике или таблице).

В п. 3 содержится предупреждение о том, что если измерение выходного сопротивления будет вестись длинными импульсами, то это может вызвать значительный саморазогрев и соответственно привести к возникновению сбоя.

Предназначение п. 6 примечаний в том, чтобы показать, какие технические параметры имеют силу во всем диапазоне температур.

В п. 7 примечаний дается определение технического параметра «точность», а в п. 8 – «нелинейность». В п. 9 указывается, на какой тестовой цепи определяется ток в рабочей точке. В п. 10 сообщается о том, что одной модели из семейства могло не быть в момент выхода технической документации из печати (в настоящий момент она есть), и в п. 11 дается определение абсолютного максимума номинальных значений.

Схемы применения

Еще один важный раздел технической документации посвящен использованию устройства. В нем приводятся оригинальные и стандартные способы его применения. Иногда показанные примеры – это просто небольшие намеки, задача которых дать читателю пищу для размышлений. Просмотрев несколько схем, иллюстрирующих способы применения устройства, пользователь может разработать другие решения, которые ему и нужны. Часть из предложенных примеров может никого не заинтересовать и быть практически неприменимой.

В других случаях схема, приведенная для того, чтобы продемонстрировать способы использования устройства, может полностью определять свойства системы. В качестве такой цепи можно привести схему для тестирования устройства, то есть ту, в которой были определены и гарантированы ограничения технических параметров. Однако во всех остальных случаях характеристики типичной прикладной

¹ Формулировка п. 11 примечаний была исправлена, и здесь представлен лучший вариант из тех, что мы смогли придумать. Предполагаем использовать эту формулировку во всей последующей технической документации.

схемы не гарантируются, они всего лишь типичные. Во многих случаях характеристики схемы могут зависеть от внешних навесных компонентов, их точности и подгонки. В спецификациях некоторых производителей можно встретить следующую фразу: «Содержащиеся в этом документе прикладные схемы для всех устройств приведены только в качестве поясняющих примеров. Производитель гарантирует, что эти схемы могут быть использованы для указанных целей без дальнейшего тестирования или модификации, и не несет за это ответственности».

Возможно, в дальнейшем производители посчитают необходимым иначе сформулировать подобного рода отказы для того, чтобы избежать разочарований пользователей схемами, которые чаще всего отлично работают, но гарантировать их характеристики было бы непросто.

Раздел прикладных схем – это также отличное место, где можно поискать совет по поводу индивидуальных особенностей, потенциальных препон или незначительных деталей, которые могут оказаться очень важными, когда пользователю нужно будет получить от устройства максимальную отдачу.

Рассмотрим пример. Предположим, что буфер может обеспечивать сигнал для большой нагрузки и чисто обрабатывать быстрые сигналы (при отсутствии нагрузки). В таком случае пользователь вряд ли будет доволен, если производитель не упомянет в технической документации о том, что искажение сигнала взлетает до небес, когда к устройству подключается номинальная нагрузка.

В качестве еще одного примера можно привести совет по использованию интегральных схем из семейства LF156. «Превышение отрицательного предела синфазного сигнала на одном любом из входов вызовет изменение фазы на выходе и переведет выход усилителя в соответствующее верхнее или нижнее состояние. Превышение отрицательного предела синфазного сигнала на обоих входах переведет выход усилителя в верхнее состояние. Если не происходит ни того, ни другого, то цепь защелкивается, так как увеличение входного сигнала до предыдущего уровня в пределах диапазона синфазного сигнала переводит входной каскад и соответственно усилитель в нормальный рабочий режим».

Производителям следует предоставлять именно такую информацию, поскольку этого никто не смог бы даже предположить.

Иногда автор технической документации может нечетко выделить какую-нибудь особенность на характеристической кривой, но гораздо проще привлечь к ней внимание, написав соответствующий текст. Это обусловлено тем, что лучше огорчить пользователя заранее, прежде чем он начнет работу, чем сделать это потом, когда интегральная схема пойдет в производство. С другой стороны, если пользователь собирается эксплуатировать новое устройство дольше 10 мин., то стоит 5 мин. полностью посвятить изучению всей технической документации.

Что печатают мелким шрифтом

Что в технической документации может быть напечатано мелким шрифтом? Иногда на первой странице можно обнаружить надпись «Предварительные данные». А на последней странице – текст приблизительно такого содержания: «В этой технической документации указаны ограничения для предварительной версии устройства. Уточнения будут напечатаны позднее. Производитель оставляет за собой право

вносить изменения в устройства, описания которых содержатся в этом документе, для улучшения конструкции, технических характеристик, а также повышения качества устройства. Мы не несем никакой ответственности за использование любых схем, описанных в данном документе, не передаем никаких лицензий на использование патентов или других прав и не гарантируем, что использование этих схем не нарушает патентных прав».

По правде говоря, после того как на рынок выставляется предварительная модель устройства, инженеры очень любят вносить «незначительные улучшения» и «небольшие обновления» в спецификации и характеристики и просто ненавидят ухудшать значения параметров, указанных в документации на предварительную версию, но иногда это бывает необходимо.

Еще мелким шрифтом печатают номер телефона производителя. Лучше всего адресовать вопросы местным торговым представителям фирмы или выездному инженеру по прикладным системам, так как они могут либо знать ответ, либо объяснят, как связаться с нужным человеком на производстве, и помогут в этом.

В одних случаях инженеры по применению владеют всей информацией. В других – им приходится привлекать специалистов, занимающихся производством, тестированием, вопросами купли-продажи. И иногда быстро получить ответ не удастся – необходимо собрать данные, выработать мнения или сформулировать политику. Тем не менее приведенный телефонный номер – это тот самый ключ, который поможет обратиться к производителю.

Откуда берется техническая документация

Не вызывает сомнения, что бóльшая часть технической документации для продуктов одного класса была сделана по образцу технической документации прародителя этого класса. Берутся копии технической документации самого первого устройства и на их основе создаются новые версии.

Именно так и обстоят дела с UA709 (первый полупроводниковый интегральный операционный усилитель) и всеми его копиями, а также многими другими семействами похожих схем.

Даже сейчас попытки что-то создать основываются на удачных старых моделях, в которых при необходимости что-нибудь улучшается. Однако очень важно, чтобы от изменений был реальный толк.

Итак, несмотря на то, что очень трудно оформить техническую документацию и всем угодить, при создании новой технической документации в нее постоянно добавляется информация о новых свойствах устройств, предлагаются новые идеи по их применению, уточняются характеристики и даются советы пользователям. И если пользователи достаточно громко выражают свое недовольство тем, что их вводят в заблуждение, либо тем, что в таблицах указаны неадекватные данные, они тем самым помогут определить направление, в котором необходимо проводить изменение технической документации. Ведь очень много изменений было сделано именно «по просьбам трудящихся»!

Кто занимается написанием технической документации? Иногда сотрудник, отвечающий за маркетинг. А тестированием занимается инженерный состав. В других компаниях один инженер пишет техническую документацию, а маркетолог

и остальные инженеры проверяют результаты его работы. Бывает, что написанием технической документации занимается, по-видимому, комиссия. Ни один из этих способов не является безусловно неправильным.

Вот, к примеру, один из возможных вариантов подхода к написанию технической документации.

Непосредственный разработчик устройства создает техническую документацию (в голове) во время работы над схемой. Идея в том, что если не удастся найти подходящие «ингредиенты» для технической документации – интересные примеры, нужные пользователю свойства и тщательно протестированные характеристики, – то, может быть, не стоит считать это устройство промышленной разработкой до тех пор, пока не будут подготовлены все перечисленные компоненты. Так что сбор исходного материала для создания грамотной технической документации можно считать интегральной частью процесса разработки продукта. Непосредственное преобразование «сырья» в нечто целостное – это большое дело, требующее определенных навыков. Но заняться этим можно позже.

Когда приступать к написанию технической документации

Новое устройство готово. Инженеры-прикладники начали определять характеристики подготовленных ими прикладных схем, а инженеры-испытатели проверяют оборудование промышленного тестирования.

Но как потребители смогут разобраться, что это за устройство? У них должна быть техническая документация, которая все еще находится в процессе написания. Пока составитель технической документации пытается навести глянец и улучшить разрабатываемые документы, не проходит недели, чтобы кто-нибудь из остальных инженеров не сообщил ему: «эти ограничения и условия необходимо пересмотреть» или «использованная в этом примере схема не работает, хотя мы уверены, что все будет хорошо; через пару дней все исправим». Сотрудники, отвечающие за продажи, настаивают на том, что прямо сейчас должна быть готова окончательная версия технической документации, чтобы они могли начать печатать копии и рассылать их вместе с демонстрационными образцами.

Эти невыносимые условия объясняют, почему техническая документация всегда выглядит так, как будто ее собирали в панике, и почему в ней всегда так много «шероховатостей». Потребителям лучше знать о противоречиях: если необходимо подготовить техническую документацию «как можно быстрее», то приходится поступиться требованиями сделать ее более полной и более точной.

Читатель должен всегда задавать производителю один вопрос: «А каковы альтернативные варианты?» Если не было правильного вопроса, может возникнуть непонимание, а ссора с производителем никакой пользы не принесет.

ПРИЛОЖЕНИЕ G

ЕЩЕ РАЗ О ПРОГРАММЕ SPICE

Недавно я ездил в Новый Орлеан на одну из конференций Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) – Международный симпозиум по электронным схемам и системам (International Symposium on Circuits and Systems). Ведущий докладчик, профессор Рон Ропер (Ron Rohrer), из университета в Карнеги-Меллон (Carnegie-Mellon University) высказал свое содержательное мнение по многим вопросам подготовки инженеров. Но я был просто ошеломлен, когда услышал одно из сделанных им замечаний о том, что «в эру пакета программ SPICE больше никто не будет проектировать схемы на оберточной бумаге». О-хо-хо. Все меньше и меньше сомнений вызывает тот факт, что молодые (или ленивые?) инженеры не могут спроектировать что-нибудь масштабное без помощи компьютеров или мощных калькуляторов. Так получилось, что пакет программ SPICE – это один из «любимых» моих коньков, и я собираюсь основательно «промыть ему косточки».

Я всегда дружил с аналогиями, аналогами, аналоговыми устройствами, моделирующими устройствами, сравнениями, подобиями, моделями и метафорами. Когда я работал в компании George A. Philbrick Researches, нашим девизом был следующий: «Если моделирование, то только аналоговое». В те дни мы продавали некоторое количество аналоговых вычислительных машин, несмотря на то что этот сегмент рынка все более и более сокращался, а популярность операционного усилителя росла. Однако мы все пытались следовать политическому курсу компании, согласно которому аналоговые вычислительные машины представляли собой серьезный бизнес, – он является таковым и до сих пор, хотя его доля в бизнесе, связанном с электроникой, сократилась до ничтожной величины. До сих пор в некоторых областях применение небольшого аналогового устройства для вычислений – как раз то, что надо, и наступит день, когда я детально рассмотрю этот вопрос...

Однако пакет SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) является довольно мощным средством, широко используется, и почти каждый считает его до некоторой степени полезным. Я помню те дни, когда мой старый

начальник, Тим Исбелл (Tim Isbell), показал мне, как им пользоваться, и мы полдня бегали впустую, так как она (одна из программ пакета) сообщила, что в нашей схеме на диод подается прямое напряжение в 72 В, однако ток через этот диод не течет. Сегодня я хочу сформулировать несколько основных проблем, возникающих с пакетом программ SPICE.

Первая большая проблема заключается в том, что инженеры имеют привычку безоговорочно верить результатам работы компьютера и программ, хотя причины, по которой стоит им верить, давным-давно нет. Я с трудом сдерживаюсь, чтобы не начать махать кулаками и не заорать, когда кто-нибудь заявляет, что такой-то результат является абсолютной истиной, поскольку он был получен с помощью пакета программ SPICE. Если я не могу прогнать по этой системе калибровочную программу – санитарную проверку – так, чтобы ее результаты имели смысл, то стараюсь обходиться без SPICE.

Это здорово напоминает старые времена, когда мы работали с логарифмическими линейками: нельзя использовать логарифмическую линейку, если заранее неизвестен приблизительный результат. Это вам не калькулятор, где десятичная точка показывается на экране, – при работе с логарифмической линейкой место для десятичного знака нужно выбрать без посторонней помощи. Иначе говоря, вы должны стать очень хорошим инженером еще до того, как возьмете в руки логарифмическую линейку или воспользуетесь аналоговой вычислительной машиной.

Однако те, кто использует пакет программ SPICE, часто заблуждаются или попросту обманываются любым абсурдным результатом. Таким образом, слепая вера в компьютер, судя по всему, становится одной из серьезных опасностей. Обнаружить (через несколько недель), что компьютер вас обманул, очень просто, потому что в данные, которые вы ввели, закралась опечатка или фундаментальная ошибка. Кстати, никогда не позволяйте никому говорить, что некто Боб Пиз рекомендует использовать аналоговые вычислительные машины и макетные платы вместо системы SPICE, потому что у аналоговых вычислительных машин ошибок не бывает. SPICE врет, а аналоговые компьютеры нет?

И, пожалуйста, не надо говорить, что аналоговые вычислительные машины тоже лгут, и макетные платы лгут, но вам они нравятся, поскольку позволяют получить более наглядное представление и лучше понять, что же происходит на самом деле. Так что, если вам удастся справиться с проблемами в них, значит, у вас хватит навыков избежать и всех остальных неприятностей. Это всего лишь философия.

В отношении пакета программ SPICE меня действительно беспокоит то, что в основном разработкой системы занималась группа аспирантов, Лоуренс Нагель (Laurence Nagel) со своими коллегами из Беркли, в 1973 году. Теперь, если вы столкнетесь с проблемой, разногласием, «глюком», упущением или ошибкой, которая, судя по всему, заложена в SPICE, то можете ли вы обратиться к разработчикам этой программы? Вряд ли. Преемственность отсутствует. *Есть* специалисты, которые заявляют, что они занимаются «поддержкой» пакета программ SPICE, но я не всегда соглашаюсь с их заявлениями.

Но больше всего в пакете программ SPICE мне не нравится недостаточная сходимость алгоритма. У обыкновенной версии пакета SPICE 2G6 возникают

проблемы всех видов, даже если в схеме не используются полевые транзисторы. (Мы обнаружили, что обычно ситуация со сходимостью у полевых транзисторов по-настоящему невыносима.) Вот пример. Как-то раз я работал со схемой средних размеров, содержащей около 33 биполярных транзисторов, и сходимость была так себе. Пока, в один прекрасный день, все не начало сходиться быстро и замечательно. Я был настолько поражен, что стал «откатывать» назад свою схему, чтобы найти «корень зла». Попытался продублировать все изменения, которые внес в схему с тех пор, как в последний решал проблемы. В конце концов оказалось, что у меня образовались неиспользуемые резистор и конденсатор, подключенные между некоторой точкой и землей. К этой точке ничего подключено не было. Они были просто отмечены звездочкой. Но на каком-то этапе я стер звездочку, и получилось, что их присутствие значительно улучшило сходимость. После того как я удалил эти R и C, положение снова ухудшилось.

Это событие позволило мне понять две следующих вещи. Во-первых, сходимость – это нечто более тонкое, чем нам кажется, а во-вторых, можно случайным образом расположить ненужные резисторы в схеме так, что это позволит улучшить сходимость. Иначе говоря, если у вас есть схема с плохой сходимостью, то в компьютере могла бы быть программа, которая случайным образом разбрасывала бы по схеме несколько резисторов и смотрела, есть от этого толк или нет, – нечто вроде схемы «автосведения». В настоящее время мы все еще работаем над этой проблемой, однако такой подход может оказаться полезным. Эта концепция не должна *слишком* удивлять вас, если вы когда-нибудь слышали о том, что сходимость схемы может *зависеть от используемых имен и номеров для именования ее узлов*. Если после того, как поменяли местами имена двух узлов, алгоритм начинает сходиться быстрее (или медленнее) – то вас это не нервирует? Ну хотя бы *подозрения-то зарождаются?*

Еще с одной серьезной проблемой пакета программ SPICE я столкнулся, когда подавал несколько тестовых импульсов – треугольной формы – на коллектор транзистора. Я изменял напряжение V_c от +5 до +15 В, и вверх, и вниз, и прогнал несколько тестов. После этого ввел несколько затрудняющих работу показателей и захотел посмотреть на то, как поведет себя схема в течение первых 202 мкс прохождения треугольного сигнала частотой 10 кГц. А именно, мне захотелось после двух первых периодов треугольной волны проверить величину тока на коллекторе ($I = C \times dV/dT$) транзистора при $t = 201$ мкс. Ответ на этот вопрос я получил и в виде распечатки, и в виде графика, но все оказалось абсолютно бессмысленным. Я изучил схему целиком и воспользовался всеми известными мне методами поиска неисправностей, но все было без толку. Через емкость C_{bc} , равную 1 пФ, проходил ток силой не 0,2 мкА, а 5 мкА. Как такое могло быть?

Спустя несколько часов решил проверить форму входного сигнала. Ввел команду, в соответствии с которой входной сигнал должен был бы колебаться от 5 В до 15 В, каждая смена напряжения должна была длиться 50 мкс. Так что я точно *знал*, что именно должно было произойти. Но когда я взглянул на характеристики схемы, снятые в момент времени $t = 201$ мкс, то увидел, что dV/dt внезапно увеличился с 0,2 В/мкс до 5 В/мкс. Выяснилось, из-за того, что я дал команду на отключение режима PLOT через 202 мкс, генератор коротких импульсов изменил

значение с 15 В на 5 В, но не на промежутке 200–250 мкс, а в промежутке от 200 до 202 мкс. По абсолютно непонятной причине отношение dV/dt увеличилось в 25 раз, хотя никто этого не просил. Ничто из того, что я когда-либо слышал о пакете программ SPICE, ничего из того, о чем когда-то слышали мои друзья, не могло дать нам повод ожидать подобного. Фактически пакет SPICE как бы поощряет просматривать формы сигналов каждый раз, как только вы захотите, предлагая нечто вроде «абсолютно и бесконечно универсального осциллографа с растянутой шкалой», и если dV/dt резко меняется, то это может быть неприятным сюрпризом.

Я немедленно отправил открытое письмо всем своим друзьям в NSC, предупреждая их об этой потенциальной угрозе, а теперь пишу об этом для того, чтобы предостеречь еще более широкий круг своих друзей, где бы они ни находились.

Итак, мы рассмотрели только часть причин, по которым я без восторга думаю о системе SPICE. Этот пакет программ слишком часто подводил и меня, и моих коллег.

Мой босс указывает на то, что столь значительные проблемы со сходимостью, качеством вычислений или фальшивыми сигналами наверняка проявляются у не всех версий SPICE. Может, так оно и есть. Если кто-нибудь, кто знает все о пакетах W-SPICE или J-SPICE, хочет написать мне и убедить, что у *его* версии SPICE подобных проблем никогда не было, то я могу это только приветствовать. Однако поймите меня правильно: я не то что *ненавижу* эти цифровые компьютеры – это *они* ненавидят меня, а я *не обращаю на них внимания*.

Как-то раз я стоял на улице под дождем и разговаривал с инженером-конструктором с Восточного побережья. Он сказал, что все остальные инженеры в его компании смеются над ним, так как они верят программе SPICE, в то время как он работает с макетными платами, которые собирает самостоятельно. Есть только одно «но»: его схемы работают с первого предъявления, в то время как разработки его коллег – нет. Вдобавок к этому, что, кстати, его обижает, босс поступает с ним несправедливо: он заставляет его помогать коллегам приводить их схемы в работоспособное состояние – ведь у него остается так много свободного времени. Я сказал, что, на мой взгляд, это просто замечательно, ведь начальник вспомнит, кто может «вытянуть» цепи, когда дело дойдет до написания характеристик на всех сотрудников.

Этот инженер посоветовал мне при моделировании схем с помощью пакета программ SPICE не использовать резисторы сопротивлением 50 Ом. Вместо них он предложил ставить 50,1 Ом, в результате сходимость значительно улучшается. Звучит интригующе.

Непосредственно в данный момент я сражаюсь с отмоделированной в программе SPICE схемой. Это модель не новой, а старой схемы: источник опорного напряжения на принципе напряжения запрещенной энергетической зоны старой интегральной микросхемы LM331, которую я передал в производство еще в 1977 году. Хорошо, что удалось это сделать до того, как у нас появилась система SPICE, потому что если бы я пропустил эту схему через SPICE, то был бы полностью обескуражен. Как считает программа SPICE, у данной схемы неудовлетворительный температурный коэффициент и колебания в ней, как у продажного политика. Я вернулся

к своей модели и дважды проверил реальные, кремниевые, схемы. Они работали, как часы, вели себя спокойно при резких бросках и скачках напряжения нагрузки и имели очень низкий температурный коэффициент. Тенденция к возникновению генерации отсутствовала, они даже не «подзванивали». Так почему же тогда программа SPICE настойчиво выдавала ложную информацию? Она разве не понимала, что я «сломаю ей хребет» за дерзкую попытку солгать Царю Запрещенной Зоны? Специалисты по SPICE и по САПР, оказавшиеся поблизости, убеждали меня, что «у меня, по-видимому, плохая модель». Это я уже слышал, когда был абсолютно прав, а эксперты глубоко заблуждались. (Ну подумайте, как может самовозбуждаться один-единственный МОП транзистор на частоте 400 кГц? Всего с двумя резисторами...) Но об этом как-нибудь потом...

Я уже получил несколько писем от читателей, которые спрашивали: «А что вы можете сказать по поводу всех этих новых моделей операционных усилителей? Не поведут ли они разработчиков в новом направлении?» Свои ответы на их письма я начинал с рассказа о паре старых макромоделей операционных усилителей, которые уже более 12 лет вызывают вопросы.

Один приятель позвонил мне и спросил: «Каково максимальное значение коэффициента усиления по постоянному току у микросхемы LM108?» Я ответил: «Минимальное значение этого коэффициента составляет 40 000, но большая часть из интегральных схем работает с коэффициентом 300 000 или 500 000, а у некоторых из них он настолько высок, что достигает 3–4 миллионов». Клиент вздохнул: «Это ужасно...» Когда я спросил, что тут ужасного, он объяснил, что когда коэффициент усиления становится большим, то произведение полосы частот на усиление увеличивается. Когда этот параметр достигает десятков или сотен мегагерц, то получить устойчивую систему с отрицательной обратной связью просто невозможно.

Ох... Я сел и объяснил, что между коэффициентом усиления по постоянному току и его разбросом никакой корреляции нет, в отличие от произведения ширины полосы пропускания на усиление. Этот бедолага, оказывается, прочел книгу, где сказано, что между этими характеристиками существует тесная взаимосвязь, так как первый из полюсов – константа. Я порекомендовал ему выкинуть книгу или как минимум вырвать из нее страницы, на которых это написано, потому что характеристическая частота первого полюса *не является* константой.

Было сообщение, что сейчас несколько компаний-производителей операционных усилителей бесплатно предлагают модели, совместимые с программой SPICE. Что я думаю по поводу этих моделей?

Ну, я слышал, что на *типичной* элементной базе эти модели работают вполне нормально, что в нескольких *типичных* ситуациях у них похожая на правду скорость нарастания, в них уровень выходного напряжения устанавливается точно так же, как на реальных *типичных* операционных усилителях (они еще даже слегка «звенят», подобно реальным операционным усилителям). Точность моделей соответствует точности реальных *типичных* операционных усилителей и их резисторов обратной связи. Возможно, что через несколько лет модели медленных операционных усилителей будут заслуживать доверия. Однако я не думаю, что

получатся хорошие результаты от использования моделей быстродействующих операционных усилителей. Почему? Помехи, вызываемые топологией печатных плат. Этим все сказано.

И, кроме того, какую оценку получают эти модели, если вы спросите об этом их разработчиков? Фактически из всего, что мне удалось прочесть, следовало, что ни для одной из предлагаемых моделей ничего не гарантируется. Гарантируется только то, что есть *нечто*, что можно вручить клиенту, когда он начинает просить модель для программы SPICE. Гарантируется, что клиент уйдет довольный и первое время ему будет чем заняться. Однако не гарантируется, что он будет доволен этой моделью долгое время, потому что характеристики высокоскоростных операционных усилителей и прецизионных схем настолько сильно зависят от топологии печатной платы, от резисторов и конденсаторов, что модель сама по себе практически несущественна.

Теперь кто-нибудь, возможно, произнесет: «Как же Пиз осмеливается говорить такое?» Все очень просто. У меня никогда не было ни одной модели для SPICE, которую я мог бы предложить потребителям. И сейчас нет. А если они у меня появятся, то я тоже не смогу ничего гарантировать. В лучшем случае я, возможно, скажу: «Эти модели – инструмент для проведения пробных опытов, которые неудобно выполнять на макете, но, возможно, они покажутся вам полезными. Правда, до тех пор, пока вы будете проверять схемы на макете и убеждаться в их работоспособности. SPICE, например, можно использовать для того, чтобы «померить» напряжение или ток в некоторых точках, где они настолько малы и чувствительны, что на самом деле в реальном мире вы не смогли бы померить их с помощью осциллографа, буферизованного щупа или щупа для измерения тока. Однако если вы будете работать только с моделями и откажетесь от макетов, то не сможете разобраться во всех тонкостях, а вера в модели вас рано или поздно подведет. А сказать, что я вас не предупреждал, будет нельзя». Я показал свои записи Беттине Бриз (Bettina Briz) из Amplifier Marketing, и она сказала: «Боб, ты не можешь написать *такое*». Я ответил: «Хорошо, покажи мне, где я сказал неправду и я это исправлю». Она согласилась с тем, что весь мой рассказ, вероятно, абсолютная правда. Тогда я сказал: «Ну зачем тогда пытаться смягчить правду и делать вид, что мы можем всегда доверять компьютерам? Не оказываем ли мы тем самым медвежью услугу нашим клиентам?» На что Беттина ответила: «Когда у нас будут модели, мы начнем обучать пользователей – будем указывать, когда можно доверять модели, а когда не стоит. Итак (с учетом последнего), мы договорились?» Возможно, мы действительно договорились ...

В настоящее время у нас есть небольшая библиотека моделей операционных усилителей, реализованных с помощью фирмы Analogy¹ (Бивертон, Орегон 97075). Все они относятся к моделям уровня I (низкая точность), и хотя мы добились некоторого прогресса в области моделей хорошего качества (уровень II), они еще не до конца реализованы. Это «модели поведения», а не модели системы SPICE, и мы считаем, что у наших моделей есть определенные преимущества по сравнению

¹ Analogy Inc., P.O. Box 1669, Beaverton, Oregon 97075, (503) 626-9700.

с последними. В них предусмотрены характеристики вида минимальное/типовое/максимальное, что как нельзя лучше соответствует ограничениям в технической документации. Эти модели не распространяются бесплатно. Они даже не дешевы. Но, на наш взгляд, стоят тех денег, которые вы за них заплатите.

А теперь серьезно: где можно раздобыть модель транзистора, которая будет работать при любых условиях? Я не думаю, что вы сможете выпросить, стащить, отобрать или купить модель транзистора, которая была бы гарантирована¹. Или модель конденсатора. Или всего лишь резистора.

Зато я могу гарантировать вам, что каждый купленный или сделанный вами операционный усилитель обладает характеристиками, которые невозможно абсолютно точно передать с помощью любой компьютерной модели.

Если так получится, что для вас очень важна именно такая характеристика или ее отсутствие, то грядущие неприятности – исключительно вопрос времени.

Кроме того, я гарантирую, что одного макета, который работает без нареканий, недостаточно для того, чтобы передать эту схему в производство и получить качественную партию из 1000 штук. Одного работающего макета будет достаточно только в том случае, если вы являетесь талантливым инженером, если схема спроектирована должным образом, проведены исследования в наименее благоприятных условиях, схема построена так, чтобы ее частотная характеристика соответствует вашим требованиям и т.д. На мой взгляд, так оно и есть, и неважно, где вы покупаете себе операционные усилители.

Недавно я посетил вечернюю сессию организованного Институтом инженеров по электротехнике и электронике съезда по вопросам биполярных схем и технологий (Bipolar Circuits and Technology Meeting). Ряд компаний, занимающихся продажами средств автоматизированного проектирования, провели серьезную работу с целью анализа схемы 12-битного АЦП. Даже те из них, которые затратили на это немного времени, смогли показать, что макромодели оказались пригодным и эффективным средством для проведения качественного анализа и одновременного сокращения затрат машинного времени – это и являлось основной целью исследования. Компании, затратившие больше всех времени на анализ, не смогли установить (или промолчали об этом), что уровень шумов на источнике опорного напряжения и компараторе был довольно велик. Достигнуть 12-битного разрешения удалось бы только в схеме, где нет необходимости учитывать уровень шумов.

Если бы опытный разработчик АЦП получил в свое распоряжение упомянутые инструменты и знал, где искать шум или где подключить индуктивность проводников либо дополнительную емкость подложки, то он мог бы использовать часть средств автоматизированного проектирования для создания более совершенного АЦП. Но если бы инженер просто верил всему, что «говорит» ему компьютер, то он, скорее всего, был бы жестоко обманут.

¹ Справки о гарантированных моделях CMOS-транзисторов можно получить у Джеймса Смита (James Smith), Semiconductor Physics, Inc., 639 Meadow Grove Place, Escondido, California 92027-4236 (619) 741-3360.

Как-то раз мне позвонил клиент и уточнил, как в его схеме устранить самовозбуждение интегральных микросхем из семейства LM108. Он объяснил мне, что это была смоделированная микросхема LM108, с некоторым количеством смоделированных резисторов обратной связи, переключателей и фильтров. Я поинтересовался, не изготовил ли он макет, и есть ли на нем самовозбуждение. Он ответил, что макет сделан, и самовозбуждения на нем не наблюдается. Тогда я спросил его: «Если бы вы собрали макет и компьютерную модель и реальная схема на макете стала бы самовозбуждаться, а компьютерная модель нет, то вы не стали бы звонить и жаловаться на ваш компьютер, не так ли?» Он замолчал и задумался. Затем сообщил, что перезвонит, и повесил трубку. Больше он не звонил. А как бы *вы* поступили?

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

СПИСОК СТАТЕЙ Р. ПИЗА, ПОСВЯЩЕННЫХ ПОИСКУ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

1. "Troubleshooting is more effective with the right philosophy", *EDN*, January 5, 1989, c. 147.
2. "The right equipment is essential for effective troubleshooting", *EDN*, January 19, 1989, c. 166.
3. "Troubleshooting gets down to the component level", *EDN*, February 2, 1989, c. 175.
4. "A knowledge of capacitor subtleties helps solve capacitor-based troubles", *EDN*, February 16, 1989, c. 127.
5. "Follow simple rules to prevent material and assembly problems", *EDN*, March 2, 1989, c. 159.
6. "Active-component problems yield to painstaking probing", *EDN*, August 3, 1989, c. 127.
7. "Rely on semiconductor basics to identify transistor problems", *EDN*, August 17, 1989, c. 129.
8. "Keep a broad outlook when troubleshooting op-amp circuits", *EDN*, September 1, 1989, c. 131.
9. "Troubleshooting techniques quash spurious oscillations", *EDN*, September 15, 1989, c. 151.
10. "The analog/digital boundary needn't be a never-never land", *EDN*, September 28, 1989, c. 145.
11. "Preside over power components with design expertise", *EDN*, October 12, 1989, c. 177.
12. "Troubleshooting series comes to a close", *EDN*, October 26, 1989, c. 171.
13. "Pease's pointers rouse readers: Letters to Bob", *EDN*, May 10, 1990, c. 119.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автотрансформатор. См. Оборудование
Аккумулятор 120
 никель-кадмиевый 119
 свинцово-кислотный 120
Аналоговая схема 103
Аналоговый запоминающий
осциллограф. См. Оборудование

Б

Батарея 39, 49
 солнечная 118
Безвыводные кристаллодержатели 94

В

Видларизация 28
Выводы
 J-выводы 95
 в форме крыла чайки 95
Выпрямитель двухполупериодный
 таблица устранения неисправностей 268

Г

Генератор импульсов 144
Гибридный операционный усилитель 111
ГИР-волномер
с индикатором. См. Оборудование

Д

Двухлучевой электронный осциллограф.
См. Оборудование
Детектор КЗ. См. Оборудование
Диаграмма Боде 143
Диод
 антиперемычки 115
 выпрямительный 114
 графики зависимости V от I 287
 использование
 параллельного включения 108
 переходов транзистора 107
коэффициент наклона 105
обратное напряжение и утечка 111
обратный ток 106
пережигание зенеровских структур 115
подавители импульсных помех 115
полупроводниковый стабилитрон 113
применение характериографа 42
причины выхода из строя 112
проблемы
 изменение технологии изготовления 109
 маркировка 112
 перегрузка 111
 повреждения 113
 утечка 106
 шумы 113

проводимость при нулевом напряжении 111
 режимы отказа 112
 светодиод 111
 инфракрасный 116
 скорость переключения 108
 ток насыщения перехода 112
 упоминаемые в книге
 1N4002 108
 1N4148 106, 110
 1N4184 112
 1N825 114
 1N914 105, 106, 108, 112
 фотоэффект 11
 характеристики 106
 «хвост» сигнала 108
 Шоттки 106, 108

Дрейф 222

Дроссель 62

 «бусина» 65
 и транзисторы 64
 индуктивность 63
 магнитное поле 68
 поиск неисправного 67
 проблемы 64

ДТЛ схема 187

З

Заземление 103

Законы

 МакКенны 100
 Мерфи 17, 24, 31
 Миллигена 21
 Ома 52, 55

Защелкивание схемы

 меры предупреждения 181
 первые действия 181

«Звон» 44, 65, 84

И

Идеология Design for Testability 25

Импульсный

 источник питания 71
 преобразователь 63
 стабилизатор 34, 108

Индуктивность

 колебательный LC-контур 76
 резисторов 53

Инструменты и приборы.

См. Оборудование

Интегральная схема

 цифровая

 расположение выводов 274

Источник опорного напряжения 54

 LM329 206

 LM399 206

К

Кабель

 RG 74 104

 RG-174 103

 RG-58 104

 RG-58U 103

 виды 103

 коаксиальный

 разрушение 103

 экранированный 103

Катушка индуктивности. См. Дроссель

Ключи 128

КМОП 128

Колебательный LC-контур 76

Компаратор

 LM311 173

 LM339 171, 176

 LM612 174, 177

 LM615 174

 измерение напряжения смещения 284

 корректное состояние 177

 самовозбуждение 166, 171

 синфазный сигнал 177

 скачок синфазного сигнала 177

 чувствительность 173

 шумы 175

Конденсатор

 «выпуск» фольги 74

 джиммик 42

 диэлектрическая абсорбция 70

 измерение тока утечки 88

 керамический 75, 77, 186

 майларовый 41, 72, 81, 186

 маслонаполненный 79

 металлизированная пленка 72

 неполярный электролитический 71

 переменный 41, 42, 79

 поиск неисправностей 80

полипропиленовый 69, 80
 полистироловый 72
 полиэтилентерефталатная пленка 72
 полиэфирная пленка 72
 полиэфирный 80
 применение характериографа 42
 проблемы
 «звон» 77
 микропробой 73
 перегрев 70, 74
 с маркировкой 78
 старое оборудование 70
 шумы 73
 пьезоэлектрический эффект 77
 с диэлектриком из полимерной пленки 41
 самовосстановление
 после микропробоев 73
 слюдяной 75, 78
 танталовый 41, 73, 186
 тефлоновый 72
 керамический 75
 фильтрующий 155
 фторопластовый 72
 эквивалентное последовательное
 сопротивление 74
 электролитический 41, 69, 185
 Коэффициент напряжения. См. Закон Ома

М

Магнитное насыщение 62
 Модель
 SPICE 171
 тела человека 124
 Мост для измерения
 импеданса 62
 сопротивлений 55
 Мультиплексор
 CD4051 204
 CD4053 204
 Мю-металл 67

Н

Настройка системы
 без потенциометров 230
 «настройка нарезкой» 229
 Нелинейное сопротивление 42

О

Оборудование
 RC-магазин 39, 80
 адекватность задаче 33

АМ радио 44
 анализатор логических состояний 189
 аналоговые и цифровые приборы 38
 аналоговые измерительные приборы 222
 вспомогательные измерители 38
 детектор КЗ 45
 запасные части 42
 запоминающий осциллограф 189
 изолированные щупы 41
 изолирующие перчатки 41
 имитатор электростатического разряда 129
 инфракрасный детектор температуры 132
 макетные платы 230
 определение сметы 18
 осциллограф
 аналоговый запоминающий 35
 двухлучевой электронный 34
 режим автоматического запуска
 с двойной амплитудой 34
 щуп 34
 паяльник 46
 рабочий стол 46
 ГИР-волномер 45
 регулируемый автотрансформатор 42
 с ламповым индикатором 45
 принципиальные схемы
 используемых приборов 43
 приспособления для паяния 47
 развязывающий трансформатор 40
 разъемы для маленьких деталей 272
 сетевые адаптеры 49
 средства
 индивидуальной защиты 46
 нагрева и охлаждения 47
 стабильные источники питания 39
 увеличительное стекло 47
 универсальный генератор функций 38
 характериограф 42
 цифровой вольтметр 25, 33, 85
 4- и 5-разрядный 36
 цифровые измерительные приборы 224
 щуп для замера силы тока 34
 Однотранзисторный усилитель
 таблица устранения
 неисправностей 261, 262
 Операторы логические.
 См. Логические операторы
 Операционный усилитель
 LM324 177, 178
 LM358 177

входная емкость 151
 гарантированные характеристики 163
 дифференциальное входное сопротивление 150
 зависимость параметров от навесных элементов 139
 зависимость напряжения смещения от давления 162
 замыкание
 на землю 162
 на шину питания 162
 защита от перегрева 163
 КВИП 42
 конденсатор обратной связи 156
 КОСС 42
 ложные тревоги 152
 математическая модель 151
 недокументированные характеристики 161
 несовпадение параметров 153
 однополярное питание 149
 паразитные емкости 155
 поиск неисправностей
 по переменному току 164
 по постоянному току 164
 правила предотвращения самовозбуждения 155
 проблемы
 вибрация 162
 восстановление после отказа 160
 колебания 139
 несерьезные сбои 140
 реакция на изменение температуры 160
 самовозбуждение 159
 температурные хвосты 161
 фиксация выходного сигнала 22
 шум 139, 160
 проверка по принципу Пиза 153
 реальные угрозы 152
 самовозбуждение 166
 схема для проверки 147
 таблица устранения неисправностей 259
 температурный коэффициент напряжения сдвига 140
 усиление по шумам 148
 фильтрующий конденсатор 153
 Оптопары 118
 Самовозбуждение 44

П

Паразитные контуры 199
 Паяльник. См. Оборудование

Паяние
 припой acid-core 98
 волной припоя 98
 оборудование 46, 47
 печатных плат 85
 проблемы 43
 холодная пайка 97
 серебряный припой 98
 специальные припои 98
 трубчатый припой 97
 Переменное сопротивление.
 См. Потенциометр
 Печатная плата
 виды
 дорожек 93
 неполадок 83
 защита от утечек 90
 защитные покрытия 89
 клеточная разводка 130
 монтажные заклепки 92
 очистка поверхности 89
 проблемы
 качество изготовления 84
 отслоение фольги 85
 отсутствие паяльной маски 85
 пробой 45
 утечка сигнала 30
 размещение элементов 74
 синдром спагетти 92
 система заземления 94
 сквозные металлизированные отверстия 91
 сопротивление дорожек 94
 характеристики материалов 86
 Поиск неисправностей
 анализ отказов 26
 важность задачи 17
 видларизация 28
 выбор тестов 23
 выявление дефектов у резисторов 58
 другие книги 18
 запас деталей 80
 злоупотребление доверием 19
 меры предосторожности 70
 методы
 выявление перегретых участков 247
 выявление неисправностей 20
 дополнительное охлаждение 222
 закон Миллигена 21
 измерение тока утечки 88
 законы Мерфи 24

- моделирование схем 250
- неисправности 216, 233
- «пивная» проверка 20
- планирование работы 22
- поиск перегретых мест 234
- полное тестирование 22
- правило пяти секунд 132
- применение схемы Кельвина 97
- пружинный метод 81
- мнение эксперта 20
- моделирование схем 217
- основные дефекты 273
- привыкание к схеме 20
- причины возникновения шумов 279
- математической статистики 220
- применение посудомоечной машины 89
- ремонт по телефону 28, 78
- своевременность 227
- список угроз 19
- экспертная система 30, 31
- Потенциометр 27, 41, 141, 147
- Предохранитель
 - и термоограничители 61
 - переменный и постоянный ток 61
 - плавкий 60
 - полупроводниковый 60
 - проблемы
 - задержка срабатывания 60
 - ложное срабатывание 61
 - эквивалент на МОП транзисторах 62
- Предусилитель 94
- Преобразователь
 - АЦП 196
 - напряжение-частота 14, 200
 - ток/напряжение 85
 - цифро-аналоговый 53, 55
 - частота-напряжение 200
- Принципиальная схема 42
- Провода
 - индуктивность 104
 - обеспечение
 - изоляции 103
 - проводимости 103

Р

- Рабочий стол. См. Оборудование
- Радиоконструкторы
 - Heathkit 98
 - Knightkit 98

- Разъемы
 - фиксация 99
- Резистор
 - балластный 131, 135
 - выявление дефектов 58
 - диффузионный 54
 - измерение сопротивления 59
 - металлокерамический 57
 - металлооксидный 51
 - металлопленочный 51
 - нихромовый 54
 - пленочный 52
 - применение характериографа 42
 - проблемы
 - механические повреждения 59
 - нечеткая маркировка 54
 - ошибочный номинал 50, 58, 69, 83
 - с переменным резистором 57
 - сухие отказы 58
 - термоэлектрический эффект 60
 - электромиграция 58
 - проверка исправности 58
 - проволочный 41
 - специальная намотка 54
 - реостат 56
 - собственная емкость 55, 56
 - температурно-зависимый 58
 - термокомпенсационный 54
 - толстопленочный 53
 - тонкопленочный 53
 - углеродистый 56
 - композиционный 52
 - угольный 51
- Реле
 - герконовые 101
 - герметизированные ртутные 101
 - индуктивность 102
 - проблемы с контактами 100
 - слаботочные 100
 - твердотельные 101

С

- Самовозбуждение
 - буферизованных схем 181
 - классификация 166
 - компараторов 171
 - ложное самовозбуждение 171
 - методы борьбы 167

- Система SPICE 221
 - проблемы 217
- Стабилизатор
 - LM317L 197
 - LM320L15 197
 - μA78L05 197
 - выход из строя 208
 - защита от «дурака» 207
 - импульсный
 - на микросхеме LM3524 271, 272
 - таблица устранения неисправностей 270
 - типы 212
 - положительного напряжения
 - таблица устранения неисправностей 263, 264
 - проверка защищенности 210
 - типа LM723
 - таблица устранения неисправностей 266
- Стабилитрон 65
- Стабильные источники питания.
- См. Оборудование
- Схема выборки и хранения
 - время выборки 203
 - плавного запуска 214
- Схема Кельвина 97
- T**
- Таймер
 - LM555 185
 - LMC555 185
- Температурный коэффициент 54, 114
 - конденсатора 78
 - у резисторов 51
- Термистор 66
- Термоэлектрический термометр.
- См. Оборудование
- Технические характеристики
 - гарантии 291
 - источники информации 297
 - надписи мелким шрифтом 296
 - порядок создания 298
 - предельно допустимые номинальные значения 292
 - прикладные схемы 295
 - типовые характеристики 292
- Транзистор
 - коэффициент усиления 125
 - сильноточный 123
 - слаботочный 123
 - большой мощности 136
 - вывод от подложки 127
 - германиевый 46
 - графики предельных токов 130
 - дискретный 130
 - ДМОП 138
 - жгут тока 130
 - защита
 - от вторичного пробоя 130
 - от перегрузок 123
 - интегральный сдвоенный 124
 - использование схемы Дарлингтона 125
 - коэффициент усиления напряжения 125
 - крутизна характеристики 125
 - МОП
 - повышенная отказоустойчивость 136
 - проблемы 137
 - с незащищенным входом 128
 - начальное напряжение 125
 - одной диффузией 133
 - пара Дарлингтона 96
 - 2N1302 123
 - 2N1303C 123
 - 2N2222 133
 - 2N2369 124
 - 2N3707 107
 - 2N3771 133
 - 2N3904 107, 123, 133
 - 2N3906 123
 - 2N4117A 107
 - 2N4275 124
 - 2N5039 133
 - 2N918 124
 - 2N930 107
 - полевой 162
 - причины отказа 123
 - проблемы
 - дефекты изготовления 126
 - конструктивные допуски 124
 - неправильная установка 122, 139
 - обратный ток 123
 - скачок напряжения 64
 - электростатический разряд 123
 - распределение тока 135
 - режим насыщения 124

режимы отказа 124
 самовозбуждение 166
 силовой
 возможные причины отказа 135
 высокая температура 130
 крепление радиаторов 131
 проведение испытаний 136
 радиаторы охлаждения 132
 с планарной структурой 135
 с плоской структурой 133
 с эпитаксиальной базой 133, 135
 технологии производства 132
 совпадение характеристик 124
 технология BiFET 126
 фототранзистор 116

Трансформатор
 индуктивность 63
 питающий 65
 поиск неисправного 67
 проблемы 65
 эквивалентная схема 63
 ТТЛШ микросхема 190

У
 Универсальный генератор функций.
 См. Оборудование
 Усилитель сигнала термопары 53
 Усилитель инструментальный
 таблица устранения неисправностей 269

Ф
 Фиксация выходного операционного
 сигнала. См. Операционный усилитель

Х
 Характериограф. См. Оборудование

Ц
 Цифровая схема 17, 33, 92, 103, 115
 «висящие» входы 186
 проблемы расположения выводов 189
 связь с аналоговыми схемами 186
 формы сигналов 188
 Цифровой вольтметр. См. Оборудование
 Цифровой запоминающий осциллограф.
 См. Оборудование

Ш
 Шум
 дробовой шум 209
 на радиочастотах 233
 радиопомехи 250
 фликкер-шум 209
 электромагнитные помехи 243

Щ
 Щуп 234
 для осциллографа. См. Оборудование
 изолированный. См. Оборудование

Э
 Электрическая лампа
 применение характериографа 42
 Эффект
 микрофонный 162
 Пиза-Кохена 126

А
 Analog Devices 236

С
 CD4016 128
 CD4066 128, 186

Ф
 FD300 113

Н
 HD-1250 45

Л
 LF356 39, 145, 149
 LF400 143
 LF401 143
 LM10 43
 LM101 122, 139
 LM101AH 128
 LM108 115, 149
 LM117 128, 163

LM129 114
LM1525 221
LM169 114
LM196 128
LM199 114
LM2575 211
LM2576 211
LM2577 211
LM2578 211
LM3045 125
LM3046 161
LM3086 125
LM317 28, 66, 88
LM323 95, 96
LM324 149
LM329 114
LM331 43
LM336 114
LM340 264
LM35 47
LM350 66
LM358 149
LM35CAZ 49
LM384 93
LM385 114
LM394 124, 125
LM399 114
LM4250 149
LM607 140
LM6361 155
LM709 161
LM741 39, 141
LM7800 264
LMC660 85, 128, 150
LMC662 128
LPC660 128

M

μA741 122, 139
MIL-HDBK-217 123
MM74HC00 128

O

OP-07 140, 162

P

PN4117A-19A 107
Precision Monolithics 115

R

RC-модуль. См. Оборудование
RC-фильтр 38, 48
RC-цепочка 65
RMS-тестирование 159
RN55C 52
RN55D 51
RN60C 51
RN60D 56

T

Tektronix 125
Teledyne Components 10

V

Vapox 24
VFC. См. Преобразователь
напряжение-частота
Vishay 234

X

X7R 77

Robert A. Pease

TROUBLESHOOTING ANALOG CIRCUITS



Butterworth-Heinemann

Boston London Oxford Singapore Sydney Toronto Wellington

Роберт А. Пиз

Практическая электроника аналоговых устройств
Поиск неисправностей и отработка проектируемых схем

Главный редактор	<i>Захаров И. М.</i>
Перевод	<i>Злобин И. Г.</i>
Научный редактор	<i>Кольцов И. Л., Бряндинский А. Э.</i>
Литературный редактор	<i>Петроградская А. В.</i>
Технический редактор	<i>Прока С. В.</i>
Верстка	<i>Куликов С. Л.</i>
Графика	<i>Бахарев А. А.</i>
Дизайн обложки	<i>Антонов А. И.</i>

ИД № 01903 от 30.05.2000

Подписано в печать 22.01.2001. Формат 70×100¹/₁₆.
Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 20. Тираж 3000. Заказ № 1116

Издательство «ДМК Пресс», 105023, Москва, пл. Журавлева, д. 2/8.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ППП «Типография «Наука». 121099, Москва, Шубинский пер., 6

Темы книг по компьютерам и электронике

Укажите в анкете любую из нижеперечисленных тем
или предложите свой вариант

Учебник (в помощь пользователю)	Самоучитель IBM PC Шифрование (алгоритмы) Алгоритмы сжатия (компрессии) данных Спецификации AGP, PCI и т.п. Локальные сети Материнские платы Пакеты компьютерной верстки (Adobe FrameMaker 5.5, Corel Ventura 8.0, MS Publisher) WinFaxPro и другие «маленькие помощники» Совместная работа Macintosh+Windows Системы и протоколы безопасных транзакций через Internet, ID-systems DVD E-commerce, E-marketing, E-business Novell Netware 5.0
Для программиста	C++, Pascal, Delphi, FoxPro, ... Отладка программ (дебаггеры) Программирование игр для PC Программирование для приложений распознавания речи OpenGL, DirectX – программирование приложений VBA for Office 2000 Oracle 8i, Solaris, Clarion 5.0 Программы компании «1С» ASP, HTML, XML, Java, JavaScript SQL, SQL Server 2000
Операционные системы	Windows, UNIX, Linux, EPOC, Palm OS, Mac OS, ...
Компьютерная графика и анимация	Adobe inDesign, Adobe Photoshop 5.0, 3D MAX, Fractal Design Painter 5.0, LightWave, Corel Draw 9.0, Maya 2.5, SoftImage 3D, Macromedia Flash, Bryce ...
В помощь проектировщику	Пакеты схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат (Workbench, Accel Eda 14.0, ORCAD, ...) Различные пакеты САПР (Mechanical Desktop, Real Architect 3.8, ...) Системы архитектурного проектирования (ArchiCAD, ...) CASE-средства (ErWin, BpWin, Rational Rose)
В помощь радиолюбителю	Электронные охранные устройства Справочник по радиолампам Автомобильная электроника Акустика и акустические системы Книги для начинающих радиолюбителей Микроконтроллеры и ОЭВМ (программирование) Радиолюбительские конструкции Спутниковое телевидение
Ремонт бытовой и радиоаппаратуры	Модернизация и ремонт ПК Ремонт устройств бытовой техники Мини-АТС Охранные системы для автомобилей Справочник по бытовой радиотехнике и радиодеталям СВ радиосвязь Миноискатели Радиопередатчики СВЧ схемотехника

УЧЕБНИК

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Роберт А. Пиз

Книга, написанная американским ученым Робертом Пизом, посвящена поиску неисправностей в аналоговых схемах, однако предлагаемые технические решения могут пригодиться и при работе с большинством цифровых аппаратных средств.

Автор подходит к проблеме поиска и устранения различных дефектов с позиции инженера-проектировщика, иллюстрируя теоретические положения примерами из личного опыта.

В книге рассматриваются методы выявления неисправностей, тестирования схем и их компонентов, подробно анализируются неполадки, связанные с пассивными и активными элементами и устройствами: резисторами, конденсаторами, диодами, транзисторами, операционными усилителями, источниками опорного напряжения, стабилизаторами и др. Приводятся разводка печатных плат и информация о кабелях. Дополнительные сведения о причинах неисправностей представлены в многочисленных приложениях.

ISBN 5-94074-004-9



9 785940 740049



BUTTERWORTH
HEINEMANN